

ISSN 2712-8970



# **СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

## **SIBERIAN AEROSPACE JOURNAL**

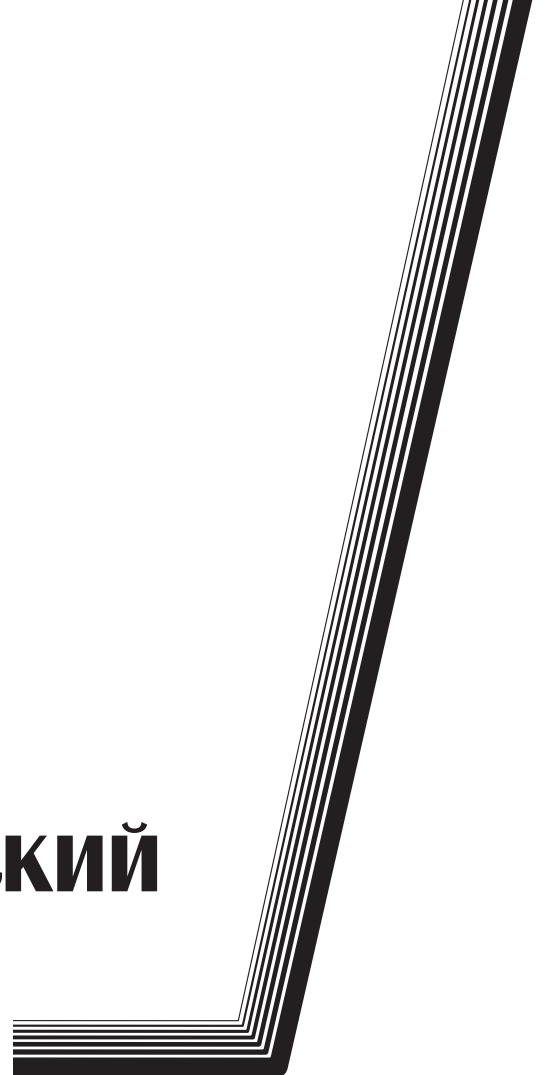
**Том  
Vol. 25, № 4**

**КРАСНОЯРСК 2024**

# **СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

Том 25, № 4

Красноярск 2024



# СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 25, № 4

## Главный редактор

**Аплеснин Сергей Степанович**, доктор физико-математических наук, профессор  
(СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

## Заместители главного редактора

**Логинов Юрий Юрьевич**, доктор физико-математических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Мурыгин Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ответственный  
за подготовку выпусков журнала, содержащих секретные сведения (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Сенашов Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### Российские члены редакционной коллегии:

**Галеев Р. Г.**, доктор технических наук  
(АО «НПП «Радиосвязь»)

**Головенкин Е. Н.**, доктор технических наук,  
профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Казаковцев Л. А.**, доктор технических наук,  
профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Левко В. А.**, доктор технических наук, доцент  
(СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Лившиц А. В.**, доктор технических наук,  
профессор (ИрГУПС)

**Максимов И. А.**, доктор технических наук  
(АО «РЕШЕТНЕВ»)

**Михеев А. Е.**, доктор технических наук,  
профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Москвичев В. В.**, доктор технических наук,  
профессор (СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН)

**Садовский В. М.**, член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук, профессор  
(ИВМ СО РАН)

**Сафонов К. В.**, доктор физико-математических  
наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Сильченко П. Н.**, доктор технических наук,  
профессор (СФУ)

**Смирнов Н. А.**, доктор технических наук,  
профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Терсков В. А.**, доктор технических наук,  
профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Чеботарев В. Е.**, доктор технических наук,  
доцент (АО «РЕШЕТНЕВ»)

**Шайдуров В. В.**, член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук, профессор  
(ИВМ СО РАН)

### Иностранные члены редакционной коллегии:

**Яхно А. Н.**, кандидат физико-математических наук,  
профессор (Университет Гвадалахары, Мексика)

**Станимирович Предраг**, Ph.D., профессор  
(Нишский Университет, Сербия)

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Васильев С. Н.**, академик РАН, доктор физико-  
математических наук, профессор (Москва)

**Дегерменджи А. Г.**, академик РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор (Красноярск)

**Дегтерев А. С.**, доктор технических наук,  
профессор (Красноярск)

**Колмыков В. А.**, кандидат технических наук,  
профессор (Химки)

**Миронов В. Л.**, член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор (Красноярск)

**Семенкин Е. С.**, доктор технических наук,  
профессор (Красноярск)

**Тестоедов Н. А.**, академик РАН,  
доктор технических наук, профессор  
(Красноярск)

**Шабанов В. Ф.**, академик РАН, доктор физико-  
математических наук, профессор (Красноярск)

# SIBERIAN AEROSPACE JOURNAL

Vol. 25, No 4

---

*Chief Editor:*

**Aplesnin S. S.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

*Deputy Chief Editors*

**Loginov Y. Y.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

**Murygin A. V.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

**Senashov S. I.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

---

## EDITORIAL BOARD

*Russian members of the editorial board:*

**Galeev R. G.**, Dr.Sc.

(JSC "NPP "Radiosvyaz")

**Golovenkin E. N.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Kazakovtsev L. A.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Levko V. A.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Livshits A. V.**, Dr.Sc., Professor  
(Irkutsk State Transport University)

**Maksimov I. A.**, Dr.Sc.  
(JSC RESHETNEV)

**Mikheev A. E.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Moskvichev V. V.**, Dr.Sc., Professor  
(SDTB Nauka KSC SB RAS)

**Sadovsky V. M.**, Corresponding Member  
of the Russian Academy of Sciences,  
Dr.Sc., Professor (ICM SB RAS)

**Safonov K. V.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Silchenko P. N.**, Doctor of Technical  
Sciences, Professor (SibFU)

**Smirnov N. A.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Terskov V. A.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Chebotarev V. Y.**, Dr.Sc., Professor  
(JSC RESHETNEV)

**Shaidurov V. V.**, Corresponding Member  
of the Russian Academy of Sciences,  
Dr.Sc., Professor (ICM SB RAS)

*Foreign members of the editorial board:*

**Yakhno A. N.**, Cand. Sc. professor  
(University of Guadalajara, Mexico)

**Stanimirovic Predrag**, Ph.D., professor  
(University of Nis, Serbia)

## EDITORIAL COUNCIL

**Vasiliev S. N.**, Academician of the Russian  
Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Moscow)

**Degermendzhi A. G.**, Academician  
of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc.,  
Professor (Krasnoyarsk)

**Degterev A. S.**, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

**Kolmykov V. A.**, Cand.Sc., Professor (Khimki)

**Mironov V. L.**, Corresponding Member  
of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc.,  
Professor (Krasnoyarsk)

**Semenkin E. S.**, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

**Testoedov N. A.**, Academician of the Russian  
Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor  
(Krasnoyarsk)

**Shabanov V. F.**, Academician of the Russian  
Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)



## К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

«Сибирский аэрокосмический журнал» является научным, производственно-практическим рецензируемым изданием. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-80539 от 01.03.2021 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN 2712-8970

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» — 39263.

Зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Включен в базу данных Ulrich's Periodicals Directory американского издательства Bowker.

Входит в перечень журналов ВАК по следующим научным специальностям:

1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки);

1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки);

2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);

2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (физико-математические науки);

2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (физико-математические науки);

2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические науки);

2.5.13 Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов;

2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки).

Издается с 2000 года. 2000 — «Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева» (Вестник САА); 2002 — «Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева» (Вестник СибГАУ); 2017 — «Сибирский журнал науки и технологий» (СибЖНТ); с 01.03.2021 — «Сибирский аэрокосмический журнал» (САЖ).

Каждый выпуск журнала включает три раздела:

1 раздел. Информатика, вычислительная техника и управление.

2 раздел. Авиационная и ракетно-космическая техника.

3 раздел. Технологические процессы и материалы.

Статьи публикуются бесплатно после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции ([www.vestnik.sibsau.ru](http://www.vestnik.sibsau.ru)). Журнал выходит 4 раза в год. Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (<http://www.elibrary.ru>) и сайте журнала ([www.vestnik.sibsau.ru](http://www.vestnik.sibsau.ru))

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Сибирский аэрокосмический журнал» ссылка обязательна.

### Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

АДРЕС РЕДАКЦИИ, УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ:

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский Рабочий», 31.

Тел. (391) 290-42-31. E-mail: [vestnik@sibsau.ru](mailto:vestnik@sibsau.ru)

Редактор Н. Н. ГОЛОСКОКОВА  
Ответственный редактор английского текста  
Н. А. ШУМАКОВА

Оригинал-макет и верстка О. А. ПЛЕХОВОЙ

Подписано в печать 16.12.2024. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 16,97.

Уч.-изд. л. 15,8. Тираж 100 экз. Заказ 3521. С 1015/24.

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

Отпечатано в редакционно-издательском центре  
СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск,  
просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31.

Дата выхода в свет: 26.12.2024. Свободная цена

## INFORMATION FOR AUTHORS AND SUBSCRIBERS

*Siberian Aerospace Journal* is a research, production and practical peer-reviewed journal. Included by the Higher Attestation Commission of the Russian Federation in the Index of Leading Russian Peer-Reviewed Journals and Periodicals, in which significant scientific dissertation results should be published when applying for a Dr.Sc. degree.

The journal is the official periodical of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

Certificate of Registration as a Mass Media Resource. Certificate: PI No. FC 77-80539, dated 01 March 2021, given by Federal Supervision Agency for Information Technology, Communications and Mass Media. ISSN 2712-8970.

The Journal is included in the following subscription catalogue 39263 — Pressa Rossii.

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal is indexed in the database of Ulrich's Periodicals Directory.

The journal was first published in 2000. 2000 — Vestnik Sibirskoy aerokosmicheskoy akademii imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SAA); 2002 — Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU); 2017 — Siberian Journal of Science and Technology (SZHT); from 01.03.2021 — Siberian Aerospace Journal (SAJ). The Journal is recommended for publishing the main results of research when applying for Cand. Sc. degree and Dr. Sc. degree upon the following specialties:

1.2.2 Mathematical modeling, numerical methods and software packages (technical sciences);

1.2.2 Mathematical modeling, numerical methods and software packages (physical and mathematical sciences);

2.3.1 System analysis, management and information processing (technical sciences);

2.3.5 Mathematical and software support of computer systems, complexes and computer networks (physical and mathematical sciences);

2.3.7 Computer modeling and design automation (physical and mathematical sciences);

2.3.7 Computer modeling and design automation (technical sciences);

2.5.13 Design, Construction, Production, Testing and Operation of Aircraft;

2.5.15 Thermal, electric rocket engines and power installations of aircraft (technical sciences).

Each issue consists of three parts:

Part 1. Informatics, computer technology and management.

Part 2. Aviation and Spacecraft Engineering.

Part 3. Technological Processes and Material Science.

Papers prepared in accordance with the editorial guidelines ([www.vestnik.sibsau.ru](http://www.vestnik.sibsau.ru)) are published free of charge after being peer reviewed.

The journal is published four times a year.

An online version can be viewed at <http://www.elibrary.ru>

*Siberian Aerospace Journal* should be cited when reprinting or citing materials from the journal.

CONTACTS. Website: [www.vestnik.sibsau.ru](http://www.vestnik.sibsau.ru)

Address: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation.

Tel. (391) 290-42-31; e-mail: [vestnik@sibsau.ru](mailto:vestnik@sibsau.ru)

Editor N. N. GOLOSKOKOVA  
Executive editor (English Language) N. A. SHUMAKOVA  
Layout original O. A. PLEKHOVA

Signed (for printing): 16.12.2024. Format 70×108/16.

Offset Paper. Print flat. 16,97. Published sheets 15,8.

100 copies. Order 3521. С 1015/24.

Printing and Publication Department  
Reshetnev University.

Printed in the Department of copying and duplicating  
equipment Reshetnev University.

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk,  
660037, Russian Federation.

Date of publication: 26.12.2024. Free price

# СОДЕРЖАНИЕ

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Гончаров А. Е.</b> К вопросу об использовании байесовского метода для поиска подводных объектов .....                                                               | 412 |
| <b>Иголкин А. А., Сафин А. И., Кузнецов А. В.</b> Расчётно-экспериментальные исследования динамических характеристик макета рамы телескопа космического аппарата ..... | 423 |
| <b>Никифоров Д. Л., Ефимов С. Н.</b> Алгоритм уточнения углов поворота и наклона камеры на летательный аппарат по записанному видео .....                              | 433 |

## АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

|                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Иванилова Т. Н., Кузнецов Е. В., Кушнеров А. В., Серегин А. В.</b> Виртуальная имитация пульта заправки современного гражданского самолёта .....                                                        | 442 |
| <b>Казыкин А. А., Мусонов В. М.</b> Оценка погрешностей измерения навигационно-посадочных параметров с использованием псевдоспутников .....                                                                | 454 |
| <b>Нестеров В. А., Габидулин С. В.</b> Исследование жесткости композитной спицы зонтичной антенны космического аппарата .....                                                                              | 464 |
| <b>Тимофеев А. Л., Султанов А. Х., Мешков И. К., Гизатулин А. Р.</b> Повышение точности позиционирования системы ГЛОНАСС .....                                                                             | 482 |
| <b>Черненко В. В., Черненко Д. В., Толстопятов М. И., Манохина Э. С., Фалькова Е. В.</b> Динамические параметры потока в естественных криволинейных координатах для линии тока во вращающемся канале ..... | 493 |

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

|                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Мелентьев Д. О., Пискажова Т. В., Донцова Т. В.</b> Методы и проблемы калибровки космических магнитометров на анизотропном магниторезистивном эффекте .....                                       | 508 |
| <b>Стебелева О. П., Кашкина Л. В., Вшивкова О. А., Минаков А. В.</b> Применение высокоскоростной гидродинамической технологии для получения рафеновых наносупензий из природных графитов .....       | 521 |
| <b>Харьков А. М., Ситников М. Н., Аплеснин С. С.</b> Магнитоимпеданс в тулий марганцевом халькогениде .....                                                                                          | 531 |
| <b>Шестаков И. Я., Семёнова Л. А., Шестаков В. И., Швалёва Н. А., Ремизов И. А.</b> Шероховатость поверхности при электро-контактно-электрохимической обработке с вибрацией катода-инструмента ..... | 539 |

# CONTENTS

## INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

|                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Goncharov A. E.</b> On the application of the Bayesian Search Method for detecting underwater objects .....                                                      | 412 |
| <b>Igolkin A. A., Safin A. I., Kuznetsov A. V.</b> Calculation and experimental study of the dynamic characteristics of the spacecraft telescope frame mockup ..... | 423 |
| <b>Nikiforov D. L., Efimov S. N.</b> Algorithm for correcting camera pan and tilt on aircraft based on recorded video .....                                         | 433 |

## AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Ivanilova T. N., Kuznetsov E. V., Kushnerov A. V., Seregin A. V.</b> Virtual imitation of a fueling panel for modern civil airplane .....                                                            | 442 |
| <b>Kazykin A. A., Musonov V. M.</b> Estimation of measurement errors of navigation and landing parameters using pseudosatellites .....                                                                  | 454 |
| <b>Nesterov V. A., Gabidulin S. V.</b> Design of a flexible spoke for a spacecraft umbrella antenna .....                                                                                               | 464 |
| <b>Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Meshkov I. K., Gizatulin A. R.</b> Increasing the positioning accuracy of the GLONASS system .....                                                                  | 482 |
| <b>Chernenko V. V., Chernenko D. V., Tolstoplyatov M. I., Manokhina E. S., Fal'kova E. V.</b> Dynamic flow parameters in natural curvilinear coordinates for a current line in a rotating channel ..... | 493 |

## TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

|                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Melent'ev D. O., Piskazhova T. V., Dontsova T. V.</b> Review of problems and methods of calibration of space magnetometers based on anisotropic magnetoresistive effect .....                      | 508 |
| <b>Stebeleva O. P., Kashkina L. V., Vshivkova O. A., Minakov A. V.</b> Application of high-speed hydrodynamic technology for the production of graphene nanosuspensions from natural graphites .....  | 521 |
| <b>Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Aplesnin S. S.</b> Magnetoimpedance in thulium manganese chalcogenide .....                                                                                         | 531 |
| <b>Shestakov I. Ya., Semenova L. A., Shestakov V. I., Shvaleva N. A., Remizov I. A.</b> The surface roughness during electro-contact-electrochemical machining with vibration of a cathode-tool ..... | 539 |



ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPUTER TECHNOLOGY  
AND MANAGEMENT



УДК 556

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-412-422

**Для цитирования:** Гончаров А. Е. К вопросу об использовании байесовского метода для поиска подводных объектов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 412–422. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-412-422.

**For citation:** Goncharov A. E. [On the application of the Bayesian Search Method for detecting underwater objects]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 412–422. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-412-422.

## **К вопросу об использовании байесовского метода для поиска подводных объектов**

А. Е. Гончаров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31  
E-mail: goncharovae@sibsau.ru

*Поиски и изучение подводных антропогенных объектов, в частности исторических кораблей, является одним из наиболее актуальных направлений в современной подводной археологии, охватывающих спектр задач теоретического и прикладного характера. В практике поиска затонувших судов достаточно редким случаем является обнаружения судна на основе заранее (априори) известных данных. В связи с этим, а также использованием определений из области теории вероятности и математической статистики, естественным направлением развития систем поиска стала байесовская статистика, а именно, поисковый метод, нашедший применение в ряде известных зарубежных поисковых проектов. Метод поиска Байеса для установления местоположения затонувших судов, а также их идентификации почти не использовался в отечественной практике подводной археологии. Однако потребность в его применении существует, как это показала экспедиция 2024 г. по поиску транспортного судна «Тбилиси», потопленного в годы Великой Отечественной войны в Енисейском заливе: несмотря на относительно небольшую площадь акватории поисковой зоны, установление местоположения корабля стало весьма трудоемким процессом. В то же время применение байесовского поиска могло бы существенно облегчить данную задачу. В связи с этим в настоящей статье рассмотрена методика применения байесовского поиска для обнаружения затонувших судов (приведен пример построения распределения вероятностей в зоне поиска судна «Тбилиси»). Кроме того, автором рассмотрен вопрос об использовании байесовского метода для идентификации объектов (предложена модель базы данных с включением в нее различных параметров поиска). В качестве реального примера представлены результаты работы экспедиции 2024 г. с описанием исторического объекта, условий поиска, а также проблем, возникших в ходе проведения данной работы.*

*Ключевые слова:* байесовский поиск, подводная археология, кораблекрушение, спутниковые системы навигации, гидролокатор бокового обзора.

## **On the application of the Bayesian Search Method for detecting underwater objects**

A. E. Goncharov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: goncharovae@sibsau.ru

*Underwater archaeology and, in particular the study of shipwrecked vessels, is one of the more advanced fields in the discipline as it employs a spectrum of technical and scientific methods. Shipwreck detection and identification has been a test ground for a range of theoretical and applied approaches, such as probability theory and mathematical statistics, namely the Bayesian Search Method, which has been successfully applied for this purpose in a number of renowned international projects. In this paper we shall cover the fundamental principles of using this method to assist search efforts in determining the location of historic underwater shipwrecks. As such, the novelty of this paper consists largely in acquainting the Russophone researcher with the Bayesian Search Method in submarine exploration as very little has been published on this subject in Russian literature. As will be shown here, there does exist a demand for the application and perfection of probability search methods for underwater archaeology in the country. In 2024, an expedition to the Yenisei Gulf discovered the shipwrecked steamer Tbilisi, which sank in 1943 after striking a mine installed by the Kriegsmarine. Despite having exact charts and knowing the exact coordinates of the shipwreck, the search team had to spend hours in high seas before finally managing to detect the vessel using side-scan sonar. Applying the Bayesian Search Method would have significantly reduced the time and labor intensity of the search. Besides the search method proper, we shall consider the arrangement of a specialized database for the architecture of a suggested software application, the purpose of which is building probability distribution maps to assist the search and identification of shipwrecked vessels.*

*Keywords: Bayesian Search Method, underwater archaeology, shipwreck, satellite navigation systems, side-scan sonar.*

## **Введение**

Одной из наиболее стремительно развивающихся областей археологической науки в последние десятилетия стала подводная археология, в которую входит, среди прочего, поиск и изучение затонувших кораблей. Это обусловлено, главным образом, развитием таких технических поисковых средств, как гидроакустические системы, а также подводная робототехника. Эти изменения коснулись как технического аспекта, так и экономического. В результате подводное поисковое оборудование получило широкое распространение. Сегодня оно приобретает как академическими институтами, которые ранее не имели к нему доступа, так и различными частными организациями и физическими лицами [1]. К наиболее доступному поисковому оборудованию следует отнести, в первую очередь, мобильные гидролокаторы бокового обзора (ГБО) и в виде дополнительной аппаратной функции к линейке гражданских эхолотов, и небольшие мобильные подводные аппараты. Археологические исследования затонувших судов имеют значительную актуальность как с теоретической, так и с практической точек зрения [2–4]. В качестве исторических объектов затонувшие корабли часто предоставляют исследователям уникальную возможность получить оригинальные сведения о материальной культуре прошлого; в некоторых случаях, помимо материальных источников, удается получить даже документальные свидетельства. С другой стороны, исследование кораблекрушений представляется важной прикладной задачей, связанной с решением проблем очистки акваторий водных путей от физических препятствий, каковыми могут быть затонувшие суда. Еще одной немаловажной задачей является экологический мониторинг акватории водоемов: суда, особенно промышленной эпохи, могут представлять угрозу для окружающей среды содержанием своих трюмов, в которых может быть токсичный груз, или самим судном и его топливом. В связи с этим поиски и исследования затонувших судов являются важнейшими научными задачами.

Несмотря на применение разнообразного поискового оборудования, позволяющего, как в случае ГБО, охватывать внушительные площади донной поверхности, установление местоположения затонувших кораблей остается сложной процедурой. Даже в случае, когда географические координаты затопления известны, обнаружить подводный объект не всегда удается, а, учитывая высокую стоимость поисковых работ, аренду исследовательского судна, расходов, связанных с эксплуатацией оборудования и работы специалистов, время для проведения поле-

вых работ может быть весьма ограничено. Препятствием к проведению исследований могут стать географические и метеорологические факторы. В связи с этим требуется создание эффективной методики поиска, в рамках которой можно предварительно сузить зону поиска до районов, где нахождение затонувшего корабля наиболее вероятно.

Одним из наиболее перспективных подходов, реализующих математическую модель для определения местоположения затонувших кораблей, следует считать байесовский поисковый метод. Свое название он получил по имени английского математика XVIII в. Томаса Байеса, известного своими работами в области теории вероятности и математической статистики. Теорема Байеса хорошо известна и имеет следующий вид

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)},$$

где  $P(A)$  – априорное предположение вероятности того или иного события;  $P(A|B)$  – вероятность того, что  $A$  верно при условии апостериорной вероятности;  $P(B|A)$  – вероятность того, что  $B$  произойдет в случае верности  $A$ ; в этом случае  $P(B)$  является гарантией того, что произойдет событие  $B$ .

Байесовский метод поиска нашел достаточно продуктивное применение в ряде зарубежных поисковых проектов. Одним из наиболее известных случаев применения данного метода являются поиски американской атомной подводной лодки USS Scorpion, затонувшей в результате аварии в 1964 г. В результате применения указанного метода, многокилометровую зону поиска в Северной Атлантике удалось сузить до 300 м<sup>2</sup> [5]. Еще одним значимым достижением данного метода стало обнаружение затонувшего в 1857 г. американского пассажирского парохода Central America. Местоположение затопления судна было известно только приблизительно, поскольку авария произошла во время шторма и у экипажа не было возможности точно определить координаты судна. Кроме того, большая глубина привела к тому, что судно находилось на существенном расстоянии от места, где корабль предположительно затонул. Карта поиска, с определением вероятности нахождения судна (от 0 до 65 %) представлена на рис. 1.

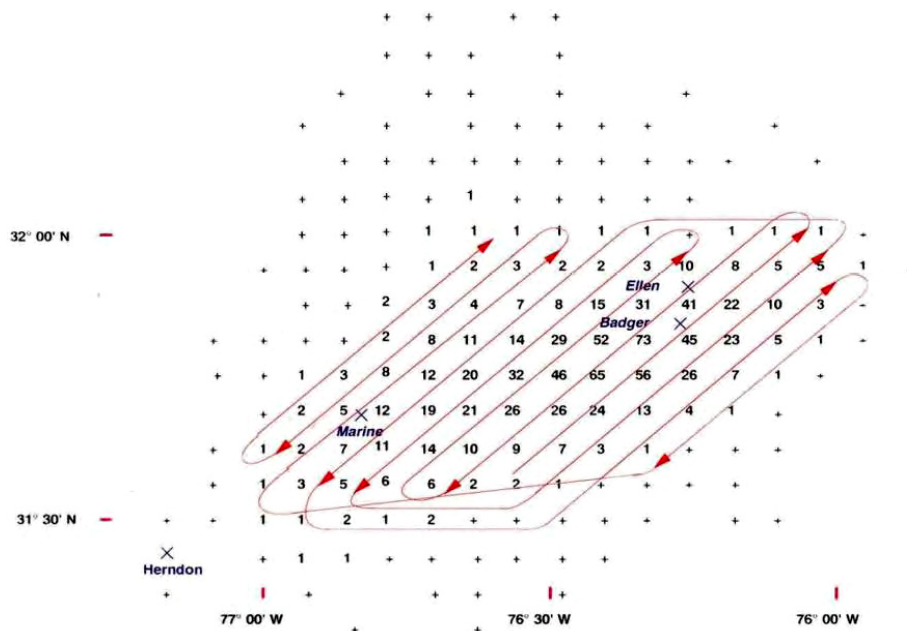


Рис. 1. Графическая модель плотности вероятности поиска парохода Central America, нанесенная на координатную сетку [6]

Fig. 1. Graphic search model for the probability distribution function for the SS Central American [6]

Таким образом, мы видим, что байесовский метод может оказаться весьма результативным при поиске затонувших кораблей. В целом, он является одним из немногих теоретических методов, отвечающих задачам, рассматриваемым в рамках настоящей работы. Как показывает практика, поиск затонувших судов, особенно в прибрежных морских зонах и внутренних водоемах, ведется, главным образом, бессистемно: известные координаты вводятся в картографические программы спутниковой навигации с целью произведения поиска *in situ*. Такой подход возлагает большую нагрузку на человеческого оператора зондирующих устройств, требуя от него высокого профессионализма и физической нагрузки. В результате поисковые работы зачастую оказываются нерезультативными. Снижение концентрации внимания оператора в результате долгой монотонной работы может привести к тому, что объект оказывается пропущенным и обнаруженным только во время камеральной обработки материалов. Несмотря на очевидную потребность эффективного поискового метода, применение байесовского метода для поиска затонувших судов продолжает оставаться слабоизученной темой. Так, в отечественной научной литературе удалось установить всего лишь одну статью по данной проблематике [7]. Немного лучше дела обстоят в зарубежной литературе [8–10], однако и данные материалы нельзя считать удовлетворительными поскольку до сих пор не существует специализированных программных средств, позволяющих внедрять байесовский поисковый метод на практике. Расчеты производятся вручную и, как правило, относительно уже найденных объектов, что имеет только теоретическую значимость.

#### Метод байесовского поиска

Метод байесовского поиска достаточно прост, что обусловлено исходной вероятностной модели. Метод является частным случаем теории принятия решений и как таковой может строиться на совокупности объективных и субъективных данных, позволяя принять оптимальное решение. Как и во многих поисковых задачах, предположение строится на основе ограниченного количества данных; качество этих данных также может оказаться невысоким.

Итак, первой задачей является построение априорного распределения, для чего имеющиеся данные, в том числе неполные и фрагментарные, необходимо упорядочить в последовательные множества, под которыми будут пониматься вероятностные сценарии. Затем необходимо придать количественную оценку неопределенностям путем определения их вероятностного фактора. Эта задача выполняется путем определения вероятности конкретного сценария, а также введением в расчет субъективных факторов. Далее необходимо рассчитать вероятностное распределение для каждого из сценариев, объединив расчеты в априорные веса (вероятности того или иного сценария). Для этого при построении поисковой модели необходимо учесть (при наличии) результаты предшествующих поисковых работ. Отметим, что даже в случае построения модели исключительно на основе объективных и точных данных, полученное распределение будет считаться лишь предположением до момента доказательства его истинности. Для байесовской модели, как и для любой статистической модели, характерным является отражение индивидуальности принятого решения, сделанного на основе наилучшего понимания задачи, а также с учетом результатов предшествующих поисков. Однако необходимо учесть, что каждый отдельный поиск является индивидуальным случаем, который нельзя воспроизвести многократно для получения эмпирического вероятностного распределения.

Обратимся к факторам, обеспечивающим эффективность байесовского поиска как метода, позволяющего:

- обеспечить принципиально новый подход, включающий в себя все объективные и субъективные данные о местоположении затонувшего судна с целью построения функции распределения вероятностей о нахождении объекта;
- построить функцию распределения вероятностей для сужения поисковой зоны с целью повышения эффективности поиска;
- включать в модель новые данные о поиске, в том числе неудачные поисковые работы, для построения апостериорной функции распределения вероятностей, что лежит в основе построения последующих поисковых маршрутов;



– получать аналитические расчеты поискового процесса с целью достижения заданного уровня эффективности последних поисковых мероприятий [9].

Необходимым условием формирования поисковой модели является создание базы данных, которая будет служить ее основой: она может иметь различные виды и формы в зависимости от требований поисковой модели, а также автономности ее работы, поэтому рассмотрим здесь лишь ее содержание. Сведения относительно технических характеристик того или иного корабля могут быть получены как из неопубликованных исторических источников (архивные данные), так и опубликованных. К последним относятся различные морские статистические сборники, содержащие сведения о технических характеристиках кораблей [10]. Отметим, что некоторые суда строились по типовым проектам, следовательно, достаточно учесть характеристики проектов данного типа для организации поисковых работ. В целом, к данному блоку сведений относятся следующие параметры: длина, тип движителя (судно могло быть самоходное или несамоходное, моторное или парусное, и др.), тип груза и его количество, грузоподъемность. В некоторых случаях можно учитывать вид надстройки, материал изготовления корпуса, количество и типы машин и прочее. Однако, как показывает практика, данные параметры не всегда являются важными для проведения поиска. Важнейшими являются сведениями о скорости и направлении движения судна, записи из судового журнала о положении корабля в момент гибели (этот параметр в отношении исторических судов построен, главным образом, на основе данных счисления, а не астрономических наблюдений).

Отдельным блоком являются данные географического характера: глубина, скорость и направление течения, геоморфологические особенности дна акватории, близость суши, направление ветра, метеорологические условия и другие параметры [11]. Сведения, полученные в ходе поисковых работ, вносятся в базу данных с целью корректировки поисковой модели (рис. 2) [12]. Сюда следует отнести данные, полученные, в том числе, и с применением метода дистанционного зондирования (аэрофотосъемки и космического ДЗЗ). Отметим, что к отдельной задаче следует отнести корректировку географических координат, полученных по данным спутниковых систем навигации.

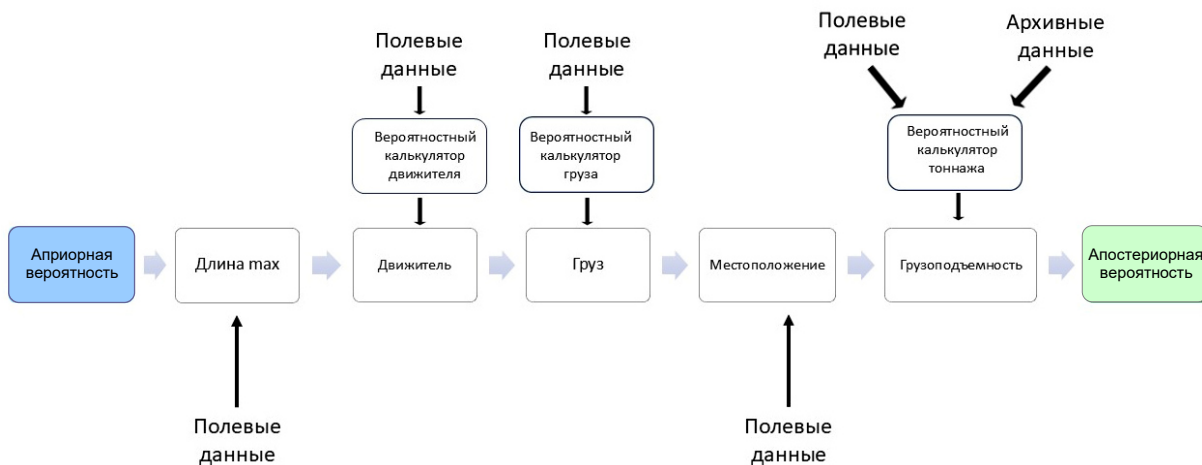


Рис. 2. Схема данных в предполагаемой базе

Fig. 2. Diagram of data input in Bayesian model data base

Ниже представлена схема базы данных, построенная на основе метода, предложенного в работе [12]. Она представляет собой байесовский метод определения вероятности обнаружения того или иного исторического судна на основе априорной вероятности. В ходе работы модели происходит ее насыщение фактическими данными, в том числе полевыми, что позволяет вывести апостериорную вероятность идентификации судна. Предложенный метод представлен в одной из наиболее оригинальных работ, посвященных системе байесовского поиска затонув-

ших судов. В отличие от схожих тематических публикаций, автором работы предложен метод не определения местонахождения судна, а его идентификации. Данная задача является актуальной, поскольку в местах активного судоходства и глубоководных акваториях в одной и той же точке может находиться множество судов одновременно. Сочетания предложенного подхода с классическим методом байесовского поиска позволяет повысить вероятность обнаружения конкретного судна.

### **Проблема локализации. Случай «Тбилиси» 2024 г.**

Летом 2024 г. группа исследователей, куда входили представители Русского географического общества, а также Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева (г. Красноярск), приняла участие в поисковой экспедиции в Енисейском заливе (район Крестовских островов) с целью обнаружения останков транспорта «Тбилиси» (капитан В. К. Субботин). Это судно входило в состав небольшого арктического конвоя, следовавшего из Дудинки в Диксон в сентябре 1943 г. При подходе к Малому Крестовскому острову судно подорвалось на немецкой магнитной мине, поставленной ранее подводной лодкой U-636, и затонуло. В судовом журнале координаты гибели судна были записаны, как N 72°25', E 80°36'. Проект по организации поиска и обследования судна, представляющего собой уникальный исторический памятник боевым действиям в ходе Великой Отечественной войны (1941–1945 гг.), разрабатывался в течение нескольких лет. В конечном варианте проект был представлен как краткосрочная поисковая экспедиция, основными методами поиска которой были ГБО, системы спутникового позиционирования и дистанционного зондирования земли, а также беспилотный летательный аппарат. В случае обнаружения судна, его исследования должны были продолжить аквалангисты.

С учетом известных координат объекта зона поиска представляла собой квадрат со сторонами около 1,3 км, что составляло приблизительно 1,7 км<sup>2</sup>. Глубины в зоне поиска постоянны и составляют в среднем около 12 м, что позволяет настраивать дальность бортового луча ГБО, работающего в мегагерцовом диапазоне, на 30–40 м. Для того чтобы полностью охватить изучаемую область акватории (с перекрытием зоны акустической тени), с учетом рекомендованной скорости движения буксируемого измерительного преобразователя от 1,5 до 3 км, потребуется приблизительно 3–4 ч. Это условие не всегда возможно выполнить, например, по причине плохих погодных условий. Кроме того, ввиду высокой стоимости фрахтования судна, с которого происходил поиск, на все поисковые работы было отведено не более 1,5 суток.

Опыт оператора ГБО позволил определить точное местоположение кораблекрушения по истечению 3,5 ч поисковых работ с борта маломерного судна. Последующие погружения к кораблю позволили его точно идентифицировать. Маршрут поиска ГБО по причине сильного ветра и большой волны (1–1,5 м) был построен в виде концентрических кругов, что противоречит традиционной методике поиска, каковой являются галсовые проходы. Однако направления ветра и волн не позволили использовать данную методику. Очевидно, что описанный метод поиска не может считаться эффективным, поскольку полагается исключительно на опыт оператора ГБО, а также на случай. Поэтому, рассмотрим организацию поисковых работ по поиску «Тбилиси» с использованием метода Байеса.

### **Математическая модель Байеса**

Для построения поисковой модели необходимо выполнить следующие шаги:

- выдвинуть наиболее вероятные гипотезы о том, что могло произойти с судном (количество гипотез не ограничено);
- для каждой из гипотез необходимо построить функции плотности вероятности для местонахождения объекта;
- построить функцию вероятности нахождения кораблекрушения в заданной точке  $X$  при проведении поиска в заданной точке. Необходимо учесть, что при проведении поисковых работ в зонах с большими глубинами, данная функция отражает глубину. В случае проведения поис-

ков на мелководье, вероятность обнаружения объекта существенно возрастает, поскольку судно лежит на дне приблизительно в том же месте, где произошло погружение;

– использовать представленную выше информацию для построения графической модели плотности вероятности, что предполагает умножение двух функций. Таким образом, нахождение кораблекрушения в точке  $X$  для всех точек  $X$ ;

– далее построить поисковый маршрут от точек с наибольшей вероятностью к точкам с наименьшей;

– систематически пересматривать все новые вероятности в ходе поиска. Так, если в предполагаемой точке  $X$  в результате поисковых работ, например, гидролокатором бокового обзора, не было обнаружено никаких обломков корабля, то вероятность нахождения судна в этой точке должна быть существенно снижена, в то время как вероятность для других точек должна возрасти.

Представим себе зону поиска, разбитую на сетку, где вероятность нахождения затонувшего судна в каждой из квадратов выражается  $P$ . Истинность данного предположения выражается  $Y$ . В случае если судно не обнаружено в заданном квадрате, то согласно теореме Байеса, скорректированная вероятность будет:

$$P = \frac{P(1-Y)}{(1-P) + P(1-Y)} = P \frac{1-Y}{1-PY} < P.$$

В случае если априорная вероятность  $r$  для каждого квадрата истинна, то вероятность апостериорная будет выражаться следующим образом:

$$r' = r \frac{1}{1-PY} > r.$$

Рассмотрим практический метод данного подхода в отношении поиска судна с известными параметрами (характеристики судна, геофизические факторы и другие известные переменные) на примере [13; 14].

Первым действием будет разбиение поисковой зоны на квадраты.

|         |   |     |   |   |
|---------|---|-----|---|---|
| $i = 1$ | 2 | 3   | 4 | 5 |
| 6       | 7 | ... |   |   |
|         |   |     |   |   |
|         |   |     |   |   |
|         |   |     |   |   |

Далее представим, что вероятность обнаружения объекта имеет вид  $Pr(Z_i = 1|Y_i = 1)$ , где  $i$  – индекс квадрата;  $Z_i$  – результаты поиска в  $i$ -й ячейке;  $Y_i$  – истинное положение подводного объекта в  $i$ -й ячейке (единица означает, что объект найден): в этом случае  $Pr(Y_i = 1)$ . Необходимо учитывать, что объект может отсутствовать в заданном квадрате, что может быть выявлено в ходе его обследования.

Теперь рассмотрим метод Байеса применительно к поискам «Тбилиси». Разобьем зону поиска ( $1,69 \text{ км}^2$ ) на квадратную сетку, состоящую из 16 квадратов, каждый из которых  $\approx 105,6^2$ , что вполне удовлетворительно, учитывая длину судна более 100 м (рис. 3, а). Центр сетки разместим на точке с известными историческими координатами. Определим наибольшую вероятность нахождения судна в четырех центральных квадратах – 0,17, а, наименьшую – 0,01. Аналогичным образом построим карту вероятностей по глубинам заданной местности с вероятностями от 0,29 (min) до 0,98 (max). Зная, что средняя глубина в поисковой зоне 12 м, квадраты с наи-

меньшими глубинами будут представлять большую вероятность нахождения в них судна. Сочетав эти значения, получим новые показатели вероятности для каждого квадрата (рис. 3, б).

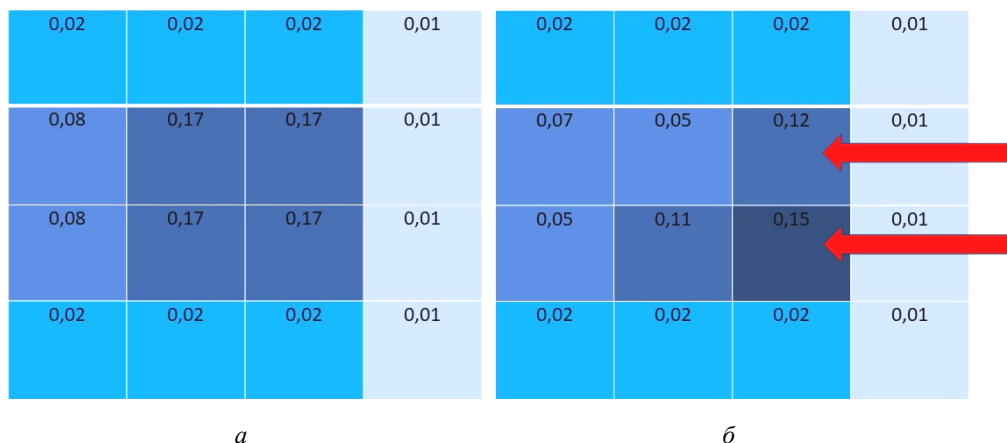


Рис. 3. Сетка распределения вероятностей:  
а – априорная; б – апостериорная с учетом глубин акватории

Fig. 3. Probability density map: а – prior; б – posterior based on depth map

Как видно, наиболее вероятными квадратами были 0,12 и 0,15 (обозначены стрелками). Начав поиски с нижнего квадрата, удалось установить, что корабля здесь нет. В связи с этим уточним вероятностную модель с учетом этих данных:

$$P[Q | N] = \frac{P[Q](1 - P[Y | Q])}{(1 - P[Q] + P[Q])(1 - P[Y | Q])},$$

где  $Q$  – предположительное наличие объекта;  $N$  – отсутствие объекта;  $Y$  – обнаружение объекта.  $P[Q]$  и  $P[Y | Q]$  являются вероятностями, выведенными из построенных сеток.

Уточненная вероятность для квадрата 0,15 с учетом заданной глубины 0,86, получим:

$$P[Q | N] = \frac{0,17(1 - 0,86)}{(1 - 0,17) + 0,17(1 - 0,86)} = 0,03.$$

Таким образом, вероятность нахождения «Тбилиси» в квадрате 0,17 изменилась (с учетом глубины) до 0,15, а затем до 0,03. Это, в свою очередь, повышает вероятность нахождения корабля в других квадратах:

$$P[Q] = \frac{P[Q]}{(1 - P[Q]) + P(Q) \cdot (1 - P[N | Q])}.$$

Так, вероятность нахождения объекта в соседних квадратах увеличивается до 0,12 и 0,13 соответственно. Далее поиск продолжается, изучая, в первую очередь, квадраты с наибольшей вероятностью. Результат поиска представлена на рис. 4. Как видно, судно удалось обнаружить в квадрате, в котором априорная вероятность (большая глубина) была занижена до показателя 0,05. Оказалось, что глубины на лотциях этого района даны без учета нахождения затонувшего судна, что в данном конкретном случае сводило фактор глубины до малозначимого. На практике начинать поиски с квадрата, имеющего наибольшую вероятность нахождения объекта, не всегда наиболее эффективно, поскольку чтобы до него добраться необходимо сначала пройти все остальные квадраты, поэтому при построении маршрута поиска следует начать с прилегающих квадратов, где вероятность нахождения объекта более низкая: тем более, что, как видно из рис. 4, существует вероятность обнаружения обломков судна в прилегающих квадратах.

Это, безусловно, увеличит шансы обнаружить затонувшее судно. Тем не менее применение байесовского поиска позволяет выстроить наиболее адекватный маршрут поиска с включением в него необходимых факторов.

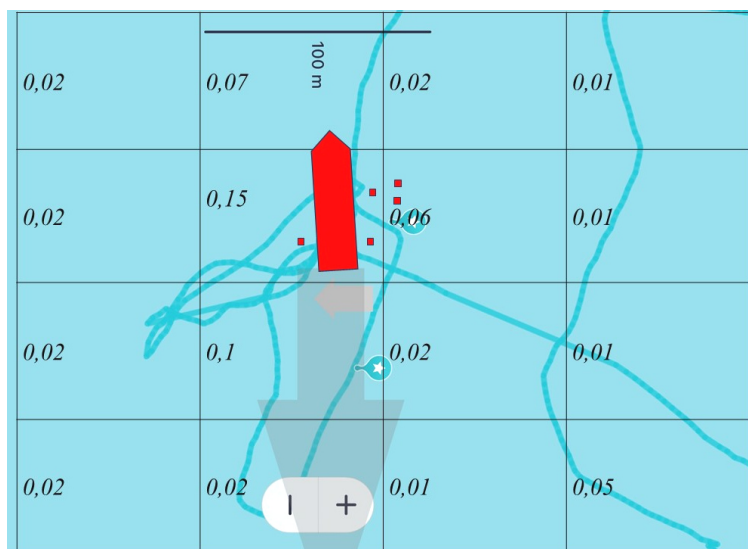


Рис. 4. Зона поиска транспорта «Тбилиси» с нанесением на нее сетки распределения вероятностей.

Пятиугольник – обозначает судно, а квадраты – обломки

Fig. 4. Search area of the SS *Tbilisi* with an overlaying probability density map.

The shapes represent the vessel and scatted debris on the seabed

### Заклучение

В результате применения байесовской системы поиска затонувших судов, можно существенно повысить эффективность поиска затонувших судов, причем сделать это заблаговременно. Ряд параметров, рассматриваемых в классических моделях (например, глубину), при этом можно исключить. В систему поиска можно вносить дополнительные параметры подводного объекта, позволяющие не только повысить вероятность его нахождения, но и его идентификации. Если размеры судна являются основным фактором, позволяющим его обнаружить, то такие характеристики, как тип судна и его движителя (самоходное/ несамоходное/ парусное/ моторное) служат дополнительными факторами, способствующими его идентификации. При этом, в случае отсутствия сведений о корпусе судна либо его разложении, данный фактор, а также сведения о силовых установках судна (котлах) и типе механического движителя (винт, гребное колесо) становятся основными параметрами, определяющими вероятность его обнаружения или идентификации. Таким образом, удалось удачно сочетать два направления в философии байесовского поиска затонувших судов. Дальнейшее развитие данного метода представлено в [15–16] и заключается в создании эффективной программной среды, позволяющей интегрировать обновляющиеся базы данных по подводным объектам, новые полученные геоданные, в том числе с ГБО и других систем дистанционного зондирования, включающие в себя системы дистанционного зондирования земли. В дальнейших исследованиях мы планируем обратиться к созданию подобной среды, используя за основу такие инструменты статистического анализа, как JASP.

### Библиографические ссылки

1. Prospects for using sonar for underwater archeology on the Yenisei: surveying a 19th century shipwreck / A. E. Goncharov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2016. Vol. 155, No. 1. P. 012037.

2. Detlie J. Searching for a lost PPW: SS William Rockefeller // *Threats to Our Ocean Heritage: Potentially Polluting Wrecks*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 129–141.
3. The study of an ancient shipwreck using marine remote sensing techniques, in Kefalonia Island (Ionian Sea), Greece / M. Geraga et al. // *Archaeologia maritima mediterranea: International Journal on Underwater Archaeology*. 2015. No. 12. P. 183–200.
4. 3D reconstruction of a shallow archaeological site from high-resolution acoustic imagery: the Grace Dieu / R. M. K. Plets, J. K. Dix, J. R. Adams, A. I. Best // *Applied Acoustics*. 2008. No. 69. P. 399–411.
5. Richardson, H. R., Stone, L. D. Operations analysis during the underwater search for Scorpion // *Naval Research Logistics Quarterly*. 1971. Vol. 18(2). P. 141–157.
6. Stone L. D. Search for the SS Central America: mathematical treasure hunting // *Interfaces*, 1992. No. 22. P. 32–54.
7. Гукова К. С., Комиссарова Е. В. Методы поиска на основе вероятностных моделей // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2019. Т. 2. С. 271–272.
8. Shmuel Zamir D. A. Optimal Sequential Search: A Bayesian Approach // *Ann. Statist.* 1985. No. 13(3). P. 1213–1221.
9. Caudle K. Searching algorithm using Bayesian updates // *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*. 2010. Vol. 29. No. 1. P. 19–29.
10. CLIP – the Crew List Index Project [Электронный ресурс]. URL: <https://crewlist.org.uk/about/crewlist> (дата обращения: 11.09.2024).
11. The Geoarchaeology of intertidal shipwreck sites: case-studies from highly dynamic settings in southern Brazil, Argentina and Uruguay / R. Torres et al. // *Advances in Coastal Geoarchaeology in Latin America: Selected papers from the GEGAL Symposium at La Paloma, Uruguay*. Springer International Publishing, 2019. P. 65–88.
12. O'Shea J. M. The identification of shipwreck sites: a Bayesian approach // *Journal of Archaeological Sciences*. 2004. No. 31. P. 1533–1552.
13. Bayesian Search Theory for Finding the USS *Scorpion* [Электронный ресурс]. URL: <https://www2.stat.duke.edu> (дата обращения: 06.08.2024).
14. Howgate K. A Bayesian Approach to finding lost objects. 2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lancaster.ac.uk/stor-i-student-sites/katie-howgate/2021/02/08/a-bayesian-approach-to-finding-lost-objects/> (дата обращения: 08.09.2024).
15. Project recover: Extending the applications of unmanned platforms and autonomy to support underwater MIA searches / E. J. Terrill et al. // *Oceanography*. 2017. Vol. 30. No. 2. P. 150–159.
16. Huang S. W., Chen E., Guo J. Efficient seafloor classification and submarine cable route design using an autonomous underwater vehicle // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2017. Vol. 43. No. 1. P. 7–18.

## References

1. Goncharov A. E. et al. Prospects for using sonar for underwater archeology on the Yenisei: surveying a 19th century shipwreck. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2016, Vol. 155, No. 1, P. 012037.
2. Detlie J. Searching for a lost PPW: SS *William Rockefeller*. *Threats to Our Ocean Heritage: Potentially Polluting Wrecks*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 129–141.
3. Geraga M. et al. The study of an ancient shipwreck using marine remote sensing techniques, in Kefalonia Island (Ionian Sea), Greece. *Archaeologia maritima mediterranea: International Journal on Underwater Archaeology*. 2015, No. 12, P. 183–200.
4. Plets R. M. K., Dix J. K., Adams J. R., Best A. I. 3D reconstruction of a shallow archaeological site from high-resolution acoustic imagery: the Grace Dieu. *Applied Acoustics*. 2008, No. 69, P. 399–411.
5. Richardson H. R., Stone L. D. Operations analysis during the underwater search for Scorpion. *Naval Research Logistics Quarterly*. 1971, Vol. 18(2), P. 141–157.

6. Stone L. D. Search for the SS Central America: mathematical treasure hunting. *Interfaces*. 1992, No. 22, P. 32–54.
7. Gukova K. S. Komissarova E. V. [Search methods based on probability models]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2019, Vol. 2, P. 271–272 (In Russ.).
8. Shmuel Zamir D. A. Optimal Sequential Search: A Bayesian Approach. *Ann. Statist.* 1985, No. 13(3), P. 1213–1221.
9. Caudle K. Searching algorithm using Bayesian updates. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*. 2010, Vol. 29, No. 1, P. 19–29.
10. CLIP – the Crew List Index Project. Available at: <https://crewlist.org.uk/about/crewlist> (accessed: 11.09.2024).
11. Torres R. et al. The Geoarchaeology of intertidal shipwreck sites: case-studies from highly dynamic settings in southern Brazil, Argentina and Uruguay. *Advances in Coastal Geoarchaeology in Latin America: Selected papers from the GEGAL Symposium at La Paloma, Uruguay*. Springer International Publishing, 2019, P. 65–88.
12. O'Shea J. M. The identification of shipwreck sites: a Bayesian approach. *Journal of Archaeological Sciences*. 2004, No. 31, P. 1533–1552.
13. Bayesian Search Theory for Finding the USS *Scorpion*. Available at: <https://www2.stat.duke.edu> (accessed: 06.08.2024).
14. Howgate, K. (2021). A Bayesian Approach to finding lost objects. Available at: <https://www.lancaster.ac.uk/stor-i-student-sites/katie-howgate/2021/02/08/a-bayesian-approach-to-finding-lost-objects/> (accessed: 08.09.2024).
15. Terrill E. J. et al. Project recover: Extending the applications of unmanned platforms and autonomy to support underwater MIA searches. *Oceanography*. 2017, Vol. 30, No. 2, P. 150–159.
16. Huang S. W., Chen E., Guo J. Efficient seafloor classification and submarine cable route design using an autonomous underwater vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2017, Vol. 43, No. 1, P. 7–18.

© Гончаров А. Е., 2024

---

**Гончаров Александр Евгеньевич** – доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [goncharovae@sibsau.ru](mailto:goncharovae@sibsau.ru). <https://orcid.org/0000-0002-6640-1312>

**Goncharov Alexander Evgen'evich** – associate professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [goncharovae@sibsau.ru](mailto:goncharovae@sibsau.ru). <https://orcid.org/0000-0002-6640-1312>

---

Статья поступила в редакцию 15.11.2024; принята к публикации 25.11.2024; опубликована 26.12.2024  
The article was submitted 15.11.2024; accepted for publication 25.11.2024; published 26.12.2024

УДК 534.12

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-423-432

**Для цитирования:** Иголкин А. А., Сафин А. И., Кузнецов А. В. Расчётно-экспериментальные исследования динамических характеристик макета рамы телескопа космического аппарата // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 423–432. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-423-432.

**For citation:** Igolkin A. A., Safin A. I., Kuznetsov A. V. [Calculation and experimental study of the dynamic characteristics of the spacecraft telescope frame mockup]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 423–432. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-423-432.

## Расчётно-экспериментальные исследования динамических характеристик макета рамы телескопа космического аппарата

А. А. Иголкин, А. И. Сафин\*, А. В. Кузнецов

Самарский университет  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
\*E-mail: safin@ssau.ru

*В статье представлено расчётно-экспериментальное исследование динамических характеристик макета рамы телескопа космического аппарата. Основное внимание уделено методике проведения вибродинамических испытаний с использованием трёхкомпонентного лазерного виброметра и созданию конечно-элементной модели исследуемого макета. Для анализа динамики конструкции определены основные критерии, такие как модальные параметры, валидация модели и гармонический анализ. Особое внимание уделяется влиянию преобразования экспериментальных данных на точность расчёта критерия модальной достоверности. Исследован макет рамы телескопа, представляющий собой ферменную конструкцию, закреплённую на пружинах. Испытания проводились путём приложения случайного воздействия типа «белый шум». Получены динамические характеристики конструкции, включая собственную частоту колебаний, которая составила 93,7 Гц. Экспериментальные данные сравнивались с результатами конечно-элементного моделирования, показавшими значительное расхождение между ними, особенно в области собственных частот. Это свидетельствует о необходимости корректировки конечно-элементной модели. Рассмотрены различные критерии оценки соответствия расчётных и экспериментальных моделей, такие как координатный критерий модальной достоверности (COMAC), критерий модальной достоверности (MAC), взаимный критерий гарантии (CSAC) и взаимный коэффициент пропорциональности (CSF). Эти критерии помогают оценить степень совпадения форм колебаний и частотных характеристик. Проведён анализ влияния преобразований экспериментальных данных в разные единицы измерения на результаты расчётов этих критериев. Сделан вывод о том, что текущая расчётная модель требует доработки и уточнения параметров для достижения лучшего соответствия с реальностью.*

*Ключевые слова:* модальные параметры, конечно-элементная модель, валидация, гармонический анализ, критерии модельной достоверности, амплитудно-частотные характеристики.

## Calculation and experimental study of the dynamic characteristics of the spacecraft telescope frame mockup

A. A. Igolkin, A. I. Safin\*, A. V. Kuznetsov

Samara University  
34, Moskovskoe Shosse Str., Samara, 443086, Russian Federation  
\*E-mail: safin@ssau.ru



*The article presents a computational and experimental study of the dynamic characteristics of a spacecraft telescope frame mock-up. The main attention is paid to the methodology of vibrodynamic tests using a three-component laser vibrometer and the creation of a finite element model of the mock-up under study. To analyze the dynamics of the structure, the main criteria such as modal parameters, model validation and harmonic analysis are defined. Particular attention is paid to the effect of experimental data transformation on the accuracy of calculating the modal reliability criterion. The telescope frame mock-up, which is a truss structure fixed on springs, is investigated. The tests were carried out by applying a random impact of the “white noise” type. The dynamic characteristics of the structure were obtained, including the natural frequency of oscillations, which was 93.7 Hz. The experimental data were compared with the results of finite element modeling, which showed a significant discrepancy between them, especially in the area of natural frequencies. This indicates the need to adjust the finite element model. Various criteria for assessing the compliance of calculated and experimental models are considered, such as the coordinate criterion of modal validity (COMAC), the criterion of modal validity (MAC), the mutual guarantee criterion (CSAC) and the mutual proportionality factor (CSF). These criteria help to assess the degree of coincidence of vibration modes and frequency characteristics. An analysis of the effect of transforming experimental data into different units of measurement on the results of calculating these criteria is carried out. It is concluded that the current calculation model requires revision and clarification of parameters to achieve better compliance with reality.*

*Keywords: modal parameters, finite element model, validation, harmonic analysis, criterion of model reliability, amplitude-frequency characteristic.*

## **Введение**

В сложившейся тенденции отработки на вибрационную прочность конструкций космического аппарата (КА) с применением в качестве объекта исследования его первого лётного образца, а соответственно с применением расчётно-экспериментальных методик, задача коррекции конечно-элементной модели (КЭМ) по результатам экспериментальной отработки всё больше набирает актуальность [1–8]. В то же время, большое распространение получают бесконтактные методы получения динамических характеристик, несомненным плюсом которых является возможность проведения испытаний очень небольших и лёгких конструкций [9; 10]. Коррекция КЭМ по результатам испытаний может осуществляться прямым или итерационным методом. Также методы коррекции КЭМ можно классифицировать по использованию частотных и модальных характеристик объекта исследования [11; 12]. Как известно, использование частотных характеристик (FRF) имеет преимущества перед использованием модальных данных, так как последние обычно извлекаются из ограниченного количества точек вокруг резонирующих пиков на кривых FRF со свойственными числовыми ошибками, в то время как FRF содержит информацию от полного спектра частот. Каждый из методов характеризуется расчётом своих критериев. Однако использование различных критериев, таких как координатный критерий модальной достоверности (COMAC) с критерием модальной достоверности (MAC) [уравнение (1)] – для модальных данных и критериев для частотных данных – взаимный критерий гарантии (CSAC) [уравнение (2)] и взаимный коэффициент пропорциональности (CSF) [уравнение (3)], сводится к получению числового значения или таблице значений, которые располагаются в диапазоне от 0 до 1. В статье представлен пример расчёта некоторых из указанных критериев с учётом особенностей обработки экспериментальных данных и влияние погрешностей сопоставления расчётной и экспериментальной сеток.

Анализ корреляции функции частотных характеристик между парами в каждой точке частоты оценивается с точки зрения взаимного критерия адекватности (CSAC) и взаимного коэффициента пропорциональности (CSF). CSAC является мерой корреляции формы между экспериментальными и аналитическими частотными характеристиками в пределах от 0 до 1 [уравнение (2)]. Между тем CSF является мерой различия в амплитуде между измеренными и рассчитанными откликами в пределах от 0 до 1 [уравнение (3)]. В целом, эти две корреляционных

функции ФЧХ могут быть известны как функции взаимной корреляции подписи (CSC). Обычно они выражаются в единице процента (%) для лучшей интерпретации.

$$MAC = \frac{|\{\Psi_X\}_i^H \times \{\Psi_A\}_j|^2}{(\{\Psi_A\}_j^H \times \{\Psi_A\}_j) \times (\{\Psi_X\}_i^H \times \{\Psi_X\}_i)}, \quad (1)$$

где  $\{\Psi_X\}_i$  – экспериментальная форма частоты;  $\{\Psi_A\}_j$  – расчётная форма частоты.

$$CSAC(\omega_k) = \frac{|A_M^H(\omega_k) \times A_P(\omega_k)|^2}{(A_M^H(\omega_k) \times A_M(\omega_k)) \times (A_P^H(\omega_k) \times A_P(\omega_k))}, k = 1, 2, \dots, N_f, \quad (2)$$

$$CSF(\omega_k) = \frac{|A_M^H(\omega_k) \times A_P(\omega_k)|^2}{(A_M^H(\omega_k) \times A_M(\omega_k)) + (A_P^H(\omega_k) \times A_P(\omega_k))}, k = 1, 2, \dots, N_f, \quad (3)$$

где  $A_P$  – расчётные значения FRF виброперемещений;  $A_M$  – экспериментальные значения FRF виброперемещений;  $N_f$  – собственная частота (номер тона).

### Экспериментальные и расчётные исследования

Объект исследования – макет рамы телескопа космического аппарата дистанционного зондирования земли (КА ДЗЗ) представляет собой ферменную конструкцию (рис. 1). Для проведения испытаний конструкция была подвешена на пружинах с жёсткостями 770 и 730 Н/м. Возмущающее воздействие прикладывалось с помощью вибропульсатора со встроенным датчиком силы, что позволило получить данные по величине возмущающего воздействия. Нагружение конструкции осуществлялось в произвольном направлении в виде случайного воздействия типа «белый» шум.



Рис. 1. Макет рамы телескопа на подвесках и покраска конструкции для выделения места снятия данных

Fig. 1. Model of the telescope frame on suspensions and painting of the structure to highlight the data collection location

Исследование динамических характеристик конструкции макета рамы телескопа выполнялось с использованием трёхкомпонентного лазерного сканирующего виброметра Polytec PSV 400-3D. Предполагаемые места падения лазерного луча окрашивались в белый цвет. Так как конструкция макета имеет сложную пространственную форму (рис. 1), получение динамических харак-

теристик возможно только на 1/4 конструкции за одно измерение без перемещения измерительных устройств лазерного виброметра. Проведение последующих экспериментальных исследований при перемещении измерительных устройств позволяет получить динамические характеристики, замеренные для точек остальной части конструкции. Первоначальный анализ показал, что точки «стыка» экспериментальных сеток конструкции могут находиться в разных фазах (рис. 2). Предполагается, что данная особенность может быть связана именно с видом функции возмущающего воздействия, так как при виде воздействия «белый шум» значение фазы носит случайный характер. Разрешение данной проблемы в рамках данной статьи не предполагается.

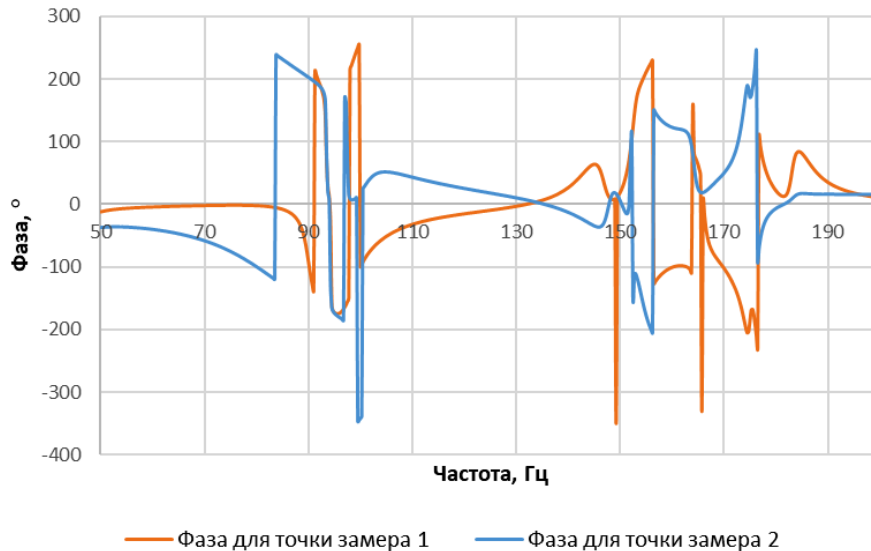


Рис. 2. Фазы совпадающих точек замера двух соседних замеров

Fig. 2. Phases of coinciding measurement points of two adjacent measurements

Использование лазерного виброметра в качестве средства измерения позволяет в качестве прямых результатов получить виброскорости в точках измерений. В специализированном программном обеспечении виброскорости могут быть преобразованы в виброускорения и виброперемещения [13]. Кроме того, наличие датчика силы позволяет также вычислять частотные характеристики в виде передаточных функций. Первичный анализ указанных характеристик позволяет сделать вывод о расположении собственных частот. Так, кривые среднеквадратичного значения амплитуд виброперемещений по всем направлениям для всех точек замеров показывают первую частоту собственных колебаний в 93,7 Гц (рис. 3). Передаточные функции позволяют вычислять модальные параметры, а именно собственные формы и частоты колебаний [14; 15]. Так как по результатам эксперимента возможно представление результатов в виде трёх различных размерностей: виброускорения, виброскорости и виброперемещения (в общем случае, для различного оборудования какая-либо из указанных характеристик является взятой непосредственно со средства измерения, а две других – вычисляются), то вычисление собственных форм также возможно при использовании в качестве исходных данных любой из характеристик. В этом случае встает вопрос погрешности, возникающей при проведении преобразований величин.

Конечно-элементная модель макета рамы телескопа КА ДЗЗ построена с использованием балочных элементов и дополнительных соединительных элементов с характеристиками жёсткости и демпфирования.

Результаты расчётов и вибрационных испытаний показали, что первая и вторая собственные частоты расчётной модели близки к экспериментальным значениям частот колебаний первого и второго тонов макета рамы телескопа. На рис. 4 представлены значения критерия МАС при

получении форм колебаний из FRF по виброперемещениям. Анализ полученных данных показывает плохое соответствие расчётных и экспериментальных форм колебаний и необходимость коррекции конечно-элементной модели, а также несущественное различие в вычисляемых критериях от преобразования экспериментальных данных в различные единицы измерения.

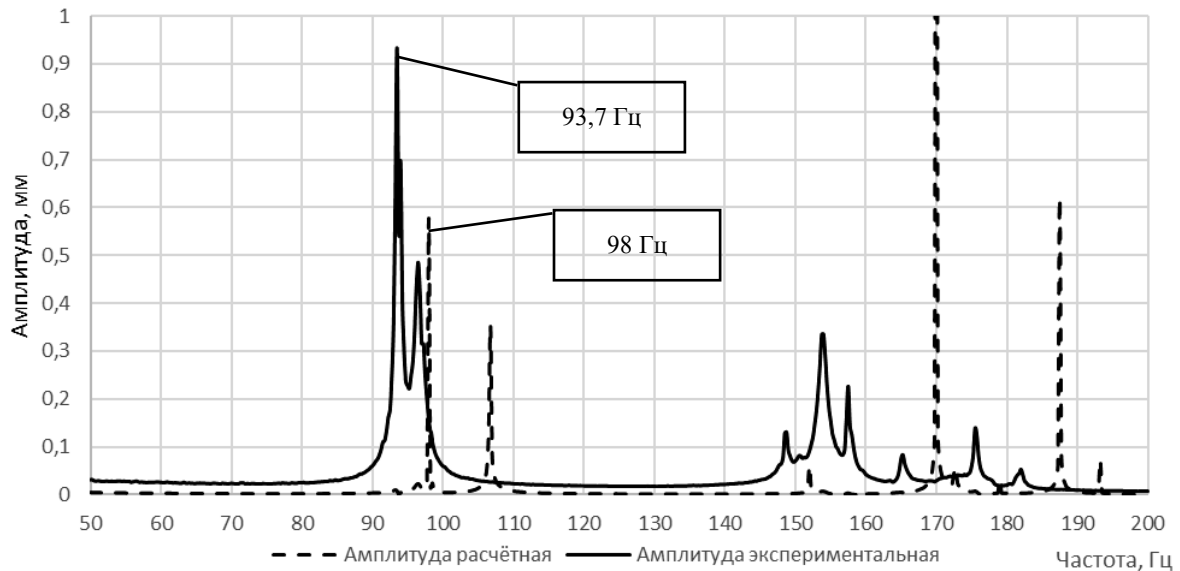


Рис. 3. Среднеквадратичные значения амплитуд виброперемещений по всем направлениям для всех точек замеров

Fig. 3. Root-mean-square values of vibration displacement amplitudes all directions for all measurement points

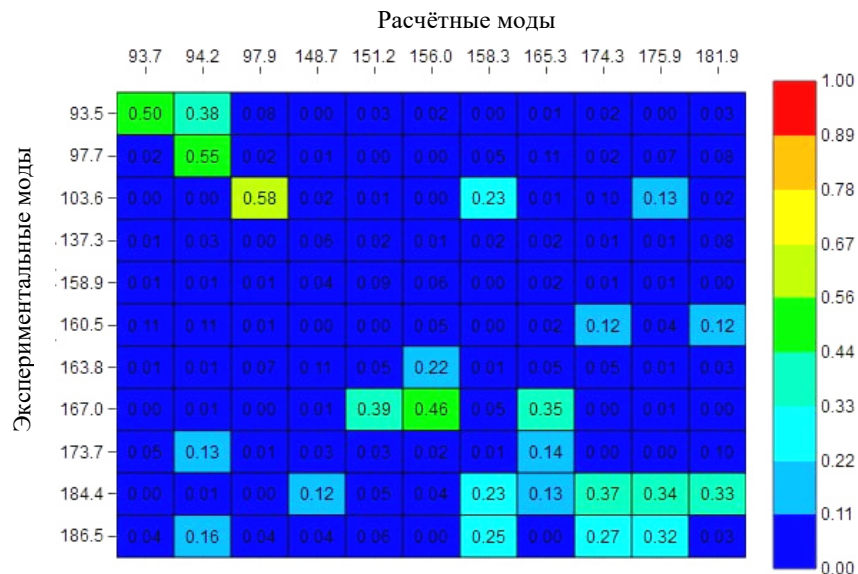


Рис. 4. Значения критерия MAC при получении экспериментальных форм колебаний от FRF по виброперемещениям

Fig. 4. MAC criterion values when obtaining experimental vibration modes from FRF based on vibration displacements

Значения COMAC (табл. 1) указывают на то, что пространственная корреляция экспериментальных и расчётных пар узлов очень низкая, данное соотношение не указывает на несоответствие расчётной экспериментальной сетки в пространстве, а говорит о различном характере

форм колебаний в экспериментальной и соответствующей ей расчётной точке. Данный факт также подтверждается тем, что узлы экспериментальной сетки можно переместить в соответствующий расчётный узел без изменения процедуры и результата вычисления COMAC. Промежуточное преобразование экспериментальных данных в различные единицы измерения не сказывается на значениях COMAC.

Особенностью расчёта CSAC является то, что необходимо сравнивать комплексные характеристики в соответствии с положительным и отрицательным направлением по степеням свободы (три поступательных и три вращательных), что в общем случае даёт 12 различных критериев. Имеющиеся экспериментальные и расчётные данные позволяют получить 3 критерия CSAC для положительного направления при поступательном движении относительно каждой из трёх осей глобальной системы координат.

Таблица 1

Значения критерия COMAC

| Номера узлов расчётных | Номера узлов экспериментальных | COMAC_X | COMAC_Y | COMAC_Z |
|------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|
| 290                    | 40                             | 0,1958  | 0,0720  | 0,2889  |
| 1971                   | 44                             | 0,1307  | 0,1043  | 0,0776  |
| 2014                   | 46                             | 0,1958  | 0,1039  | 0,2852  |
| 2262                   | 34                             | 0,0745  | 0,1285  | 0,0510  |
| 2636                   | 48                             | 0,0783  | 0,1071  | 0,0388  |
| 2810                   | 41                             | 0,0739  | 0,1701  | 0,0414  |
| 1112009                | 50                             | 0,3968  | 0,1229  | 0,2258  |
| 1112068                | 35                             | 0,1067  | 0,1174  | 0,0801  |
| 1112141                | 47                             | 0,2412  | 0,0529  | 0,0783  |
| 1112211                | 26                             | 0,1467  | 0,1729  | 0,1058  |
| 1112271                | 39                             | 0,1165  | 0,0495  | 0,1674  |
| 1112280                | 23                             | 0,1283  | 0,0812  | 0,1367  |

Полученные значения указанного критерия, а также среднеарифметическое значение представлены на рис. 5.

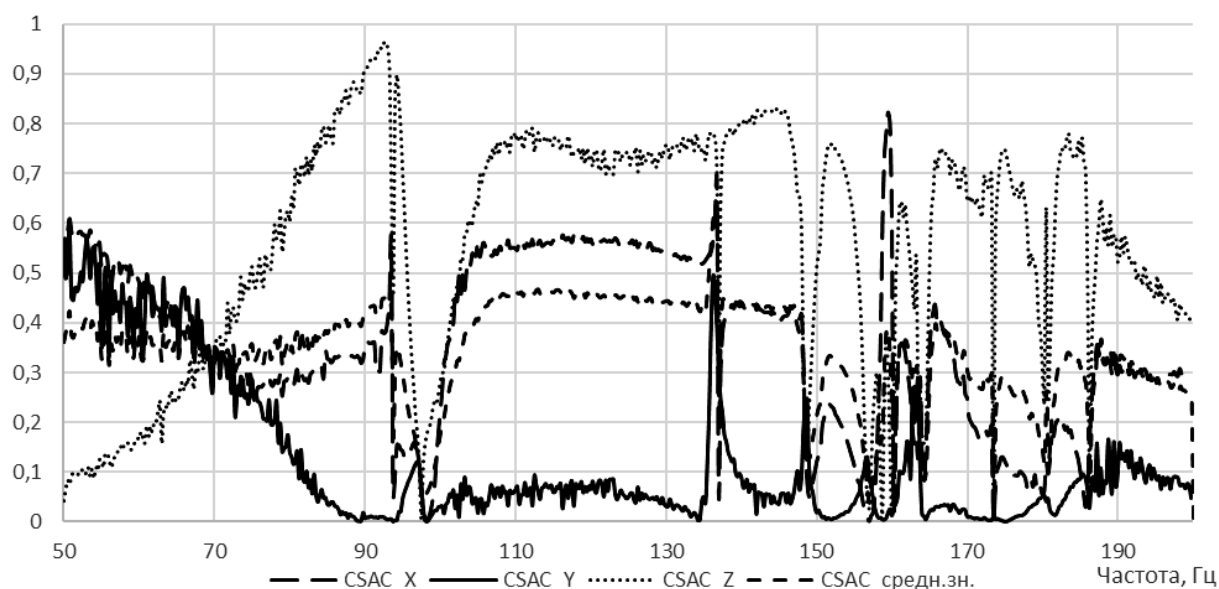


Рис. 5. Значения критерия CSAC по FRF виброперемещениям

Fig. 5. Values of the CSAC criterion for FRF vibration displacements

Анализ полученных данных показывает, что результаты расчётной модели не соответствуют динамике конструкции по оси Y в большей степени, чем по другим осям. В области собственных частот расчётная модель даёт полное расхождение с экспериментом, а в диапазоне частот от 100 до 145 Гц наиболее соответствует поведению нагруженной конструкции по осям Z и X.

Аналогично критерию CSAC, CSF так же учитывает ось и направление, что сказывается на характере кривой CSF. Однако данный критерий характеризует соответствие по амплитуде колебаний, что в свою очередь приводит к зависимости от приложенных усилий. Так как предшествующий расчёт CSAC показал несоответствие расчётной и экспериментальной модели, то расчёт критерия CSF не может иметь достоверных характер. На рис. 6 показана близость по характеру критериев CSAC и CSF для одной и той же оси (для примера взята ось Z), а также зависимость критерия CSF от значения приложенных усилий.

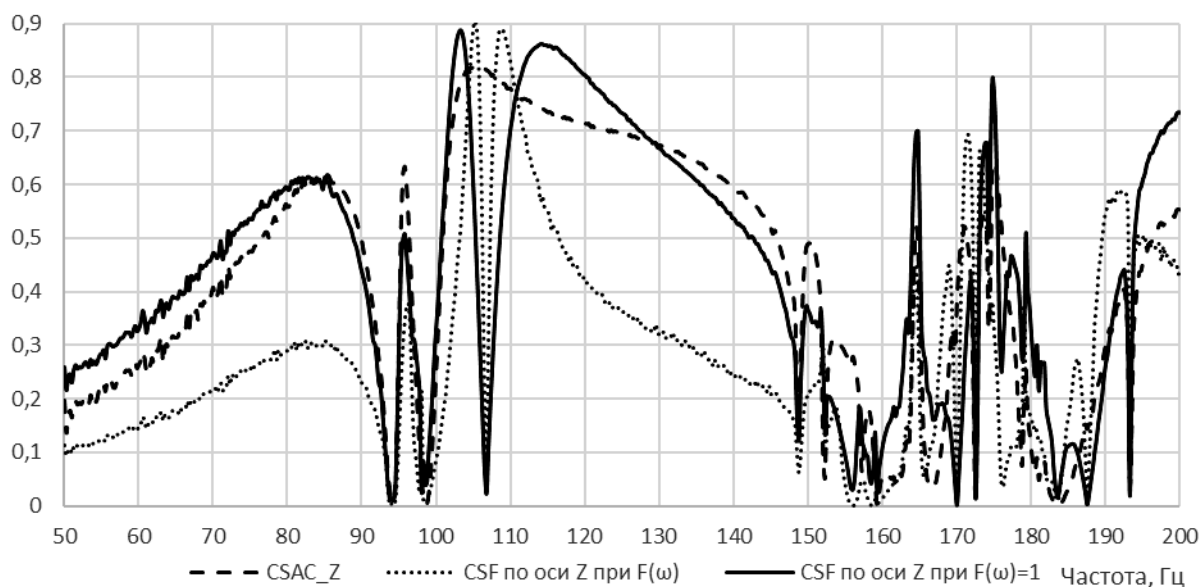


Рис. 6. Результаты расчёта критерия CSAC для оси Z; CSF при нагрузке в виде зависимости силы от частоты  $F(\omega)$ , соответствующей экспериментальным данным; CSF при нагрузке в виде единичной силы в рассматриваемом диапазоне частот

Fig. 6. Results of calculating the CSAC criterion for the Z axis; CSF under load in the form of a dependence of force on frequency  $F(\omega)$ , corresponding to experimental data; CSF under load in the form of a unit force in the frequency range under consideration

Для количественного сравнения результатов соотношения расчётных и экспериментальных данных приведём к среднему значению в процентном отношении критерии MAC по формуле (4) и CSF по формуле (5):

$$MAC_{\%} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n MAC_i}{n} \right) \times 100 \%, \quad (4)$$

где  $n$  – собственные частоты,

$$CSF_{\%} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n CSF_i}{n} \right) \times 100 \%, \quad (5)$$

где  $n$  – дискретные частоты всего диапазона измерений.

Полученные значения  $MAC_{\text{ср.зн.}} = 29,5 \%$ ;  $CSF_{\text{ср.зн.}} = 34,8 \%$  указывают на то, что корреляция экспериментальных и расчётных форм по резонансным частотам в рассматриваемой системе ниже, чем корреляция экспериментальных и расчётных частотных характеристик во всём рассматриваемом диапазоне частот.

### Заключение

Проведённое исследование показало важность использования современных методов вибродинамических испытаний и создания точных конечно-элементных моделей для анализа динамических характеристик конструкций космических аппаратов и их составных частей. Представленные методики позволяют получать детальную информацию о поведении макетов рам телескопов под воздействием внешних нагрузок, что критически важно для проектирования надёжных и долговечных космических аппаратов.

Были выявлены существенные расхождения между расчётными и экспериментальными данными, особенно в области собственных частот, что подчёркивает необходимость тщательной калибровки и корректировки конечно-элементной модели. Применение различных критериев оценки соответствия, таких как COMAC, MAC, CSAC и CSF, помогает выявить слабые стороны модели и определить пути её улучшения.

Дальнейшие работы должны быть направлены на выбор оптимальных варьируемых параметров и установление границ их значений для проведения эффективной процедуры коррекции модели. Только таким образом можно достичь высокой точности прогнозирования поведения реальных конструкций в условиях эксплуатации и обеспечить надёжность и безопасность космических миссий.

### Благодарности

Описанные в настоящей работе научно-исследовательские результаты получены в рамках выполнения и за счёт средств гранта РНФ 23-19-20025.

### Acknowledgments

The research results described in this work were obtained within the framework of and at the expense of the RSF grant 23-19-20025.

### Библиографические ссылки

1. Об оценке расходования механического ресурса конструкции российского сегмента Международной космической станции / А. В. Анисимов, Н. Ю. Введенский, А. И. Лиходед и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 1(62). С. 74–79.
2. Комаров, И. С. Наземная экспериментальная отработка изделий ракетно-космической техники на ударное воздействие от пиротехнических средств // Труды МАИ. 2013. № 71 [Электронный ресурс]. URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/a18/a181f426004cc5762b6e7e87795eb545.pdf?lang=en&issue=71> (дата обращения: 05.09.2024).
3. Хатунцева О. Н., Шувалова А. М. О дополнительных «многомасштабных» критериях подобия для экспериментальной отработки изделий аэрокосмической техники // Вестник Москов. авиац. ин-та. 2023. Т. 30, № 1. С. 91–97. DOI: 10.34759/vst-2023-1-91-97.
4. Особенности наземной экспериментальной отработки крупногабаритных солнечных батарей / С. А. Захаров, В. И. Кузоро, Н. А. Тестоедов, В. И. Халиманович // Наукоёмкие технологии. 2016. Т. 17, № 7. С. 22–28.
5. Введенский Н. Ю., Пустобаев М. В. Анализ отработки космической техники на механические воздействия в США, ЕС и РФ // Вопросы электромеханики. 2012. № 130. С. 19–26.
6. Безмозгий, И. М., Софинский А. Н., Чернягин А. Г. Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2014. № 3(6). С. 71–80.

7. Межин В. С., Обухов В. В. Сравнительный анализ методов экспериментального подтверждения конечно-элементных моделей конструкции космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2016. № 4(15). С. 14–23.
8. Balyakov D. F. Verification of finite-element model spacecraft via test results // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018. Vol. 19, No. 1. P. 8–16.
9. Lieven N. A. J., Waters T. P. The application of high-density measurements to dynamic finite element reconciliation // *Proceedings of IMAC 13*. 1995. P. 185–192.
10. Бесконтактная регистрация и анализ вибрации изделий машиностроения с помощью трёхкомпонентного лазерного вибromетра / А. А. Иголкин, А. И. Сафин, Г. М. Макарьянц, Е. В. Шахматов // *Прикладная физика*. 2013. № 4. С. 49–53.
11. Allemang R., Brown D. A correlation coefficient for modal vector analysis // 1st International Modal Analysis Conference. Orlando, USA, 1984.
12. Dascotte E., Strobbe J. Updating Finite Element Models Using FRF Correlation Functions // *Proceedings of the 17th IMAC Conference*. Kissimmee, Florida, 1999. P. 1169–1174.
13. Heylen W., Lammens S., Sas P. Modal analysis theory and testing. M. : Novatest, 2010. 319 p.
14. A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator / P. Guillaume, P. Verboven, S. Vanlanduit et al. // *Proceedings of IMAC 21, the International Modal Analysis Conference*, Kissimmee (FL), USA, February 2003.
15. Parametric Identification of Transfer Functions in the Frequency Domain – a Survey / R. Pintelon, Guillaume P., Rolain Y. et al. // *IEEE Trans. Autom. Control*. 1994. Vol. AC-39, No. 11. P. 2245–2260.

## References

1. Anisimov A. V., Vvedensky N. Yu., Likhoded A. I. et al. [On the assessment of the mechanical resource consumption of the structure of the Russian segment of the International Space Station]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*. 2011, No. 1 (62), P. 74–79 (In Russ.).
2. Komarov I. S. [Ground-based experimental testing of rocket and space technology products for impact effects from pyrotechnics]. *Trudy MAI*. 2013, No. 71 (In Russ.). Available at: <https://trudy-mai.ru/upload/iblock/a18/a181f426004cc5762b6e7e87795eb545.pdf?lang=en&issue=71> (accessed: 05.09.2024).
3. Khatuntseva O. N., Shuvalova A. M. [On additional multi-scale similarity criteria for experimental testing of aerospace products]. *Vestnik Moskov. aviats. in-ta*. 2023, Vol. 30, No. 1, P. 91–97. DOI: 10.34759/vst-2023-1-91-97 (In Russ.).
4. Zakharov S. A., Kuzoro V. I., Testoyedov N. A., Khalimanovich V. I. [Features of ground-based experimental testing of large-sized solar batteries]. *Naukoyemkiye tekhnologii*. 2016, Vol. 17, No. 7, P. 22–28 (In Russ.).
5. Vvedensky N. Yu., Pustobaev M. V. [Analysis of testing space technology for mechanical impacts in the US, EU and RF]. *Voprosy elektromekhaniki*. 2012, Vol. 130, P. 19–26 (In Russ.).
6. Bezmozgiy I. M., Sofinsky A. N., Chernyagin A. G. [Modeling in problems of vibration strength of rocket and space technology structures]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2014, No. 3 (6), P. 71–80 (In Russ.).
7. Mezhin V. S., Obukhov V. V. [Comparative analysis of methods for experimental confirmation of finite element models of spacecraft designs]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2016, No. 4 (15), P. 14–23 (In Russ.).
8. Balyakov D. F. Verification of finite-element model spacecraft via test results. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 1, P. 8–16 (In Russ.).
9. Lieven N. A. J., Waters T. P. The application of high-density measurements to dynamic finite element reconciliation. *Proceedings of IMAC 13*. 1995, P. 185–192.
10. Igolkin A. A., Safin A. I., Makaryants G. M. et al. [Noncontact registration and analysis of the product machine vibration with a three-component laser scanner]. *Prikladnaya fizika*. 2013, No. 4, P. 49–53 (In Russ.).



11. Allemang R., Brown D. A correlation coefficient for modal vector analysis. *1st International Modal Analysis Conference*. Orlando, USA, 1984.
12. Dascotte E., Strobbe J. Updating Finite Element Models Using FRF Correlation Functions. *Proceedings of the 17th IMAC Conference*. Kissimmee, Florida, 1999, P. 1169–1174.
13. Heylen W. et al. Modal analysis theory and testing. 2010, 319 p.
14. Guillaume P., Verboven P., Vanlanduit S. et al. A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator. *Proceedings of IMAC 21, the International Modal Analysis Conference*. Kissimmee (FL), USA, February 2003.
15. Pintelon R. et al. Parametric Identification of Transfer Functions in the Frequency Domain – a Survey. *IEEE Trans. Autom. Control*. 1994, Vol. AC-39, No. 11, P. 2245–2260.

© Иголкин А. А., Сафин А. И., Кузнецов А. В., 2024

---

**Иголкин Александр Алексеевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский университет. E-mail: igolkin@ssau.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7411-0534>

**Сафин Артур Ильгизарович** – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский университет. E-mail: safin@ssau.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0936-4364>

**Кузнецов Александр Владимирович** – инженер НИИ-201; Самарский университет. E-mail: al.vl.kuznetsov@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5485-427X>

**Igolkin Alexandr Alekseevich** – Dr. Sc. (Engineering), Professor; Samara National Research University. E-mail: igolkin@ssau.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7411-0534>

**Safin Artur Ilgizarovich** – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor; Samara National Research University. E-mail: safin@ssau.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0936-4364>

**Kuznetsov Alexandr Vladimirovich** – engineer; Samara National Research University. E-mail: al.vl.kuznetsov@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5485-427X>

---

Статья поступила в редакцию 11.11.2024; принята к публикации 26.11.2024; опубликована 26.12.2024

The article was submitted 11.11.2024; accepted for publication 26.11.2024; published 26.12.2024

УДК 004.021

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-433-439

**Для цитирования:** Никифоров Д. Л., Ефимов С. Н. Алгоритм уточнения углов поворота и наклона камеры на летательный аппарат по записанному видео // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 433–439. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-433-439.

**For citation:** Nikiforov D. L., Efimov S. N. [Algorithm for correcting camera pan and tilt on aircraft based on recorded video]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 433–439. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-433-439.

## Алгоритм уточнения углов поворота и наклона камеры на летательный аппарат по записанному видео

Д. Л. Никифоров, С. Н. Ефимов\*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: efimov@bk.ru

*В связи с трудностями, возникающими при использовании систем спутниковой навигации на аэродромах в настоящее время, и недостаточной точностью инерциальных навигационных систем, для проведения траекторных измерений вновь стали использоваться оптические измерительные комплексы. Однако существующие измерительные комплексы обладают рядом недостатков. Целью данной работы является описание способа повышения точности траекторных измерений, полученных угломерным методом. В статье рассматриваются основные алгоритмы, применяющиеся при проведении траекторных измерений в настоящее время и их недостатки. Предлагается алгоритм покadroвой послеполётной обработки записанного видео с камер оптико-электронного измерительного комплекса. Приводится описание реализации данного алгоритма с учётом особенностей графических программных интерфейсов для обработки ввода пользователя алгоритма. Предложенный алгоритм позволяет после проведения траекторных измерений, без ограничений по времени, уточнить углы поворота и наклона платформы в каждый момент времени. Предложенный алгоритм позволяет повысить точность как уже проведённых, так и проводимых в будущем траекторных измерений при испытаниях летательных аппаратов. Предложенный алгоритм также может использоваться для получения потенциальных углов поворота и наклона камеры при реализации угломерно-пеленгационного комплекса с применением неподвижных широкоугольных оптических камер. Например, при измерении диаграмм направленности бортовых антенн самолёта с помощью квадрокоптера-измерителя для определения его положения в пространстве в каждый момент времени. В статье также приводятся основные достоинства и недостатки алгоритма, вносятся предложения по его усовершенствованию, предлагаются возможные области его применения.*

**Ключевые слова:** траекторные измерения, пеленгационный метод, угломерный метод, оптические измерения, послеполётная обработка, определение координат летательного аппарата, спутниковые навигационные системы.

## Algorithm for correcting camera pan and tilt on aircraft based on recorded video

D. L. Nikiforov, S. N. Efimov\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: efimov@bk.ru

Due to the difficulties that arise when using satellite navigation systems at airfields at present, and the insufficient accuracy of inertial navigation systems, optical measuring systems have again begun to be used to carry out trajectory measurements. However, existing measuring systems have a number of disadvantages. The purpose of this work is to describe a method for increasing the accuracy of trajectory measurements obtained by the goniometric method. The article reviews the main algorithms currently used in trajectory measurements and their shortcomings. An algorithm for frame-by-frame post-flight processing of recorded video from cameras of an optical-electronic measuring complex is proposed. A description of the implementation of this algorithm is given, taking into account the specifics of graphical software interfaces for processing user of the algorithm's input. The proposed algorithm allows, after carrying out trajectory measurements, without time restrictions, to correct pan and tilt of the platform at each moment in time. The proposed algorithm makes it possible to increase the accuracy of trajectory measurements when testing aircraft, both already carried out and future ones. The proposed algorithm can also be used to obtain would-be pan and tilt of the camera when implementing a goniometric direction-finding complex using fixed wide-angle optical cameras. For example, when measuring the radiation patterns of an aircraft's on-board antennas using a quadcopter-meter to determine its position in space at each moment in time. The article also presents the main advantages and disadvantages of the algorithm, makes proposals for its improvement, and suggests possible areas of its application.

**Keywords:** trajectory measurements, direction finding method, goniometric method, optical measurements, post-flight processing, determination of aircraft coordinates, satellite navigation systems.

## Введение

Основным методом определения положения летательного аппарата в пространстве является использование систем спутниковой навигации [1]. В настоящее время их использование для проведения траекторных измерений на территории аэродромов по ряду причин невозможно [2]. Инерциальные навигационные системы, которые на данный момент используются вместо спутниковых, при длительных полётах накапливают значительную ошибку [3]. Помимо этого, для проведения такого рода измерений необходима установка дополнительного оборудования непосредственно на летательный аппарат, что не всегда возможно по юридическим или техническим соображениям, например, при использовании малогабаритных беспилотных летательных аппаратов с ограниченной полезной нагрузкой [4].

Одним из вариантов решения данной проблемы является использование оптических систем [5–7], таких как кинотеодолиты [8], для расчёта положения летательного аппарата по углам азимута и места с двух измерительных пунктов [9] (двухпунктный пеленгационный способ, представлен на рис. 1).

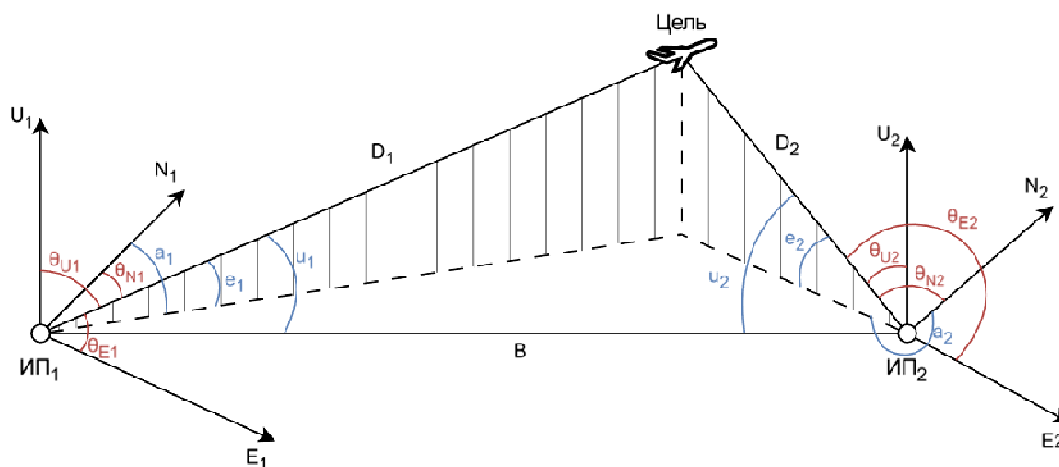


Рис. 1. Суть угломерного или пеленгационного способа определения координат

Fig. 1. Direction finding model

Однако практически не представляется возможным безошибочно следить за движением летательного аппарата. При ручном слежении за целью основное влияние на результат слежения оказывают ошибки оператора. Например, оператор не может идеально держать быстро движущийся объект в центре кадра из-за достаточно высокого времени реакции человека. Также оператор может допускать промахи из-за человеческого фактора.

Использование алгоритмов компьютерного зрения несколько упрощает задачу, но не решает проблему полностью. Яркостно-контрастные алгоритмы компьютерного зрения крайне чувствительны к погодным условиям и посторонним объектам в кадре [10]. Более продвинутые алгоритмы, основанные на машинном обучении, могут достаточно эффективно решать эту задачу, однако они требуют больших вычислительных мощностей и наличие большой обучающей выборки для каждой отдельной модели летательного аппарата, отслеживание которого планируется. Соответственно, разработка подобных алгоритмов для проведения небольших испытаний является экономически невыгодной.

Помимо этого, даже при наличии безошибочного алгоритма компьютерного зрения, принципиально невозможно решить проблему того, что поворотно-наклонный механизм имеет ограниченную скорость вращения. При этом не всегда имеется возможность использовать максимальную скорость вращения, даже если поворотно-наклонный механизм это позволяет. Камера, установленная на нём, может иметь значительный вес [11], что при резкой смене скорости может привести к выходу из строя поворотно-наклонного механизма.

Одним из решений может служить алгоритм покадровой послеполётной обработки, где оператор, не ограниченный временными рамками и физическими характеристиками измерительного комплекса, может с точностью до пикселя [12] указать положение летательного аппарата и уточнить углы поворота и наклона камеры относительно центра кадра [13].

### Описание алгоритма

Суть послеполётной обработки заключается в следующем.

Оператор, проводящий послеполётную обработку, просматривает кадры записанного видео полёта. Оператор перемещается на кадр (рис. 2), соответствующий нужному моменту времени, наводит курсор на определённую точку летательного аппарата, по которой было решено проводить траекторные измерения, и нажатием кнопки мыши запускает работу алгоритма, который корректирует углы визирования летательного аппарата.

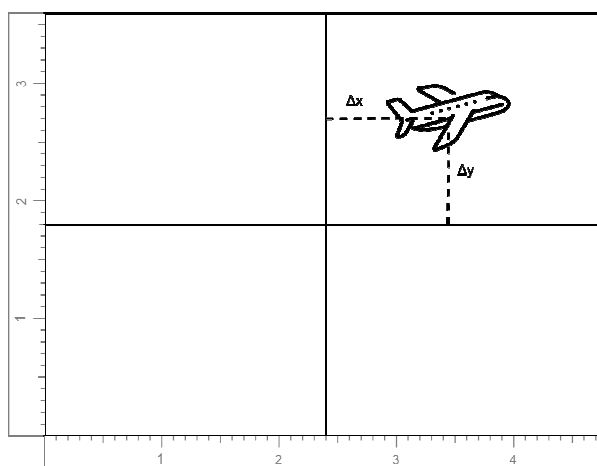


Рис. 2. Примерная схема кадра при послеполётной обработке

Fig. 2. Frame structure during post-flight processing

Поскольку при проведении послеполётной обработки разрешение монитора оператора, размер области отображения кадра и соотношение сторон, в отличие от исходного видео, могут

меняться, необходимо учитывать этот факт и не привязываться к разрешению в пикселях, а работать относительно углов обзора по горизонтали и вертикали.

Программные интерфейсы, позволяющие получить текущее положение указателя мыши, возвращают его относительно левого верхнего угла области отображения [14]. Но поскольку углы визирования цели для каждого кадра задаются относительно его центра, необходимо выполнить преобразование координат указателя мыши. Положение указателя мыши относительно центра кадра может быть вычислено по следующей формуле:

$$x_{center} = x_{toleft} - \frac{w}{2},$$

$$y_{center} = \frac{h}{2} - y_{toleft},$$

где  $x_{toleft}$  и  $y_{toleft}$  – положение указателя мыши относительно верхнего левого угла кадра;  $w$  и  $h$  – общее количество пикселей в кадре по ширине и высоте соответственно.

Теперь необходимо перейти от линейного представления в пикселях к угловому в градусах или радианах. Для этого разделим кадр на квадранты. Оси, обозначающие ширину и высоту кадра, примем равными одному углу раствора по горизонтали и вертикали соответственно. Следовательно, точки по этим осям будут принимать координаты в промежутке от  $-0,5$  до  $+0,5$ . Таким образом, мы избавляемся от необходимости знать разрешение исходного видео, чтобы посчитать цену пикселя в угловой мере. Коэффициенты линейного смещения цели относительно центра кадра могут быть вычислены по следующей формуле:

$$w_{coeff} = \frac{x_{center}}{w} = \frac{x_{toleft}}{w} - \frac{1}{2},$$

$$h_{coeff} = \frac{y_{center}}{h} = \frac{1}{2} - \frac{y_{toleft}}{h}.$$

Получить угловое смещение цели относительно центра кадра можно, умножив углы раствора объектива на соответствующие им полученные ранее коэффициенты:

$$a_{offset} = h_{FOV} \times w_{coeff},$$

$$e_{offset} = v_{FOV} \times h_{coeff},$$

где  $h_{FOV}$  и  $v_{FOV}$  – горизонтальный и вертикальный углы раствора объектива соответственно.

Теперь для получения уточнённых углов поворота и наклона камеры на летательный аппарат необходимо прибавить полученное угловое смещение к углам центра кадра.

$$a_{target} = a_{center} + a_{offset},$$

$$e_{target} = e_{center} + e_{offset}.$$

### Заключение

Рассмотренный алгоритм может быть использован при проведении траекторных измерений для повышения точности [15] расчётов положения летательного аппарата. На рис. 3 представлен пример программы послеполётной обработки, использующей данный алгоритм. Помимо этого, данный алгоритм может использоваться в системах с неподвижными широкоугольными камерами как основной способ определения углов визирования на летательный аппарат. Такая система может быть применена для измерений диаграмм направленности бортовых антенн самолёта. Однако при использовании широкоугольных камер необходимо обязательно учитывать дисторсию объектива.

Основным недостатком данного алгоритма является необходимость вручную указывать положение летательного аппарата для каждого кадра, что делает его применение для длительных полётов трудозатратным. Одним из способов решения данной проблемы может быть выборка только ключевых кадров через определённый интервал времени (например, 2 раза в секунду) в зависимости от требований, указанных в техническом задании. В качестве альтернативы, для автоматизации процесса покадровой обработки, также могут быть использованы более ресурсоёмкие алгоритмы компьютерного зрения, которые не могут быть задействованы в режиме реального времени, но пригодны при отсутствии временных ограничений на обработку одного кадра, поскольку речь идёт о послеполётной обработке записанного видео.

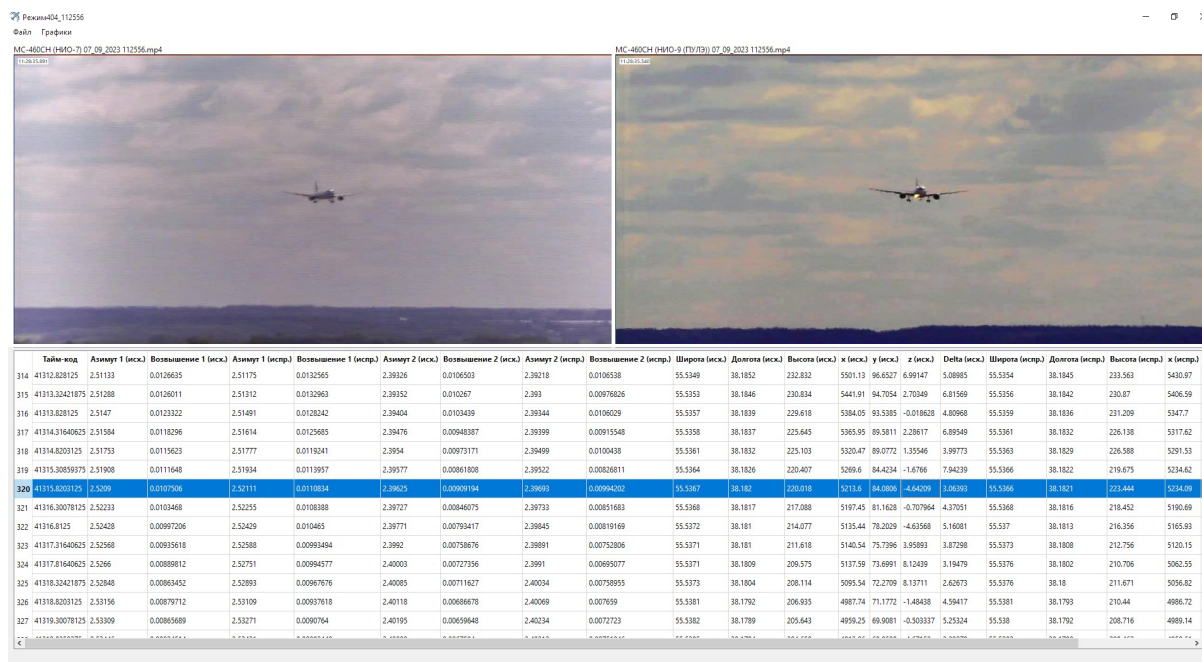


Рис. 3. Послеполётная обработка траекторных измерений MC-21

Fig. 3. Post-flight processing of Yakovlev MC-21

Основным достоинством данного алгоритма является возможность получения максимально возможной точности при проведении траекторных измерений кинотеодолиитами, поскольку при покадровой обработке имеется возможность стабильно получать углы одной и той же точки летательного аппарата.

### Библиографические ссылки

1. Hein G. W. Status, perspectives and trends of satellite navigation // *Satellite Navigation*. 2020. Vol. 1, No. 1. P. 22.
2. Гундоров К. В., Сулейманов В. Н., Медведков Д. А. Анализ работы спутниковой системы в условиях отключения Российской Федерации от навигационных систем недружественных стран // *Вестник военного инновационного технополиса «ЭРА»*. 2023. Т. 4, № 2. С. 175–183.
3. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации / Литвин М. А., Малюгина А. А., Миллер А. Б. и др. // *Информационные процессы*. 2014. Т. 14, № 4. С. 326–339.
4. Выбор типоразмерного ряда беспилотных летательных аппаратов и полезной нагрузки для мониторинга сельскохозяйственных полей / А. А. Артюшин, Р. К. Курбанов, Л. А. Марченко и др. // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. № 4 (37). С. 36–43.

5. Додонов А. Г., Путятин В. Г. Наземные оптические, оптико-электронные и лазерно-телевизионные средства траекторных измерений // Математические машины и системы, 2017. № 4. С. 30–56.
6. Calculation of 3D Coordinates of a Point on the Basis of a Stereoscopic System / R. R. Mussabayev, M. N. Kalimoldayev, Ye. N. Amirgaliyev et al. // Open Engineering. De Gruyter Open Access, 2018. Vol. 8, No. 1. P. 109–117.
7. Еналеев С. Ф. Траекторные измерения : практическое пособие. Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 124 с.
8. Гусев М. В. История развития траекторных оптических средств измерений // Матрица научного познания. 2023. № 1-1. С. 57–65.
9. Пат. RU 2 645 549 C2. Способ определения координат летательных аппаратов с использованием одного дирекционного угла и двух углов места / Д. В. Искоркин, С. В. Шишков, А. В. Терёшин и др. № 2015114888 ; заявл. 20.04.2015 ; опубл. 21.02.2018 Бюл. № 31, 10 с.
10. Hager G. D., Belhumeur P. N. Real-time tracking of image regions with changes in geometry and illumination // Proceedings CVPR IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1996. P. 403–410.
11. Пат. RU 2 758 860 C1. Способ коррекции углов визирования на точку / К. Н. Рысенков, О. С. Войченко, И. С. Зобов и др. № 2020133299 ; заявл. 09.10.2020 ; опубл. 02.11.2021 Бюл. № 31, 19 с.
12. Ko J.-H., Kim E.-S. Stereoscopic video surveillance system for detection of target's 3D location coordinates and moving trajectories // Optics Communications. 2006. Vol. 266, No. 1. P. 67–79.
13. A three-dimensional position measurement method using two pan-tilt cameras / H. Matsubara, T. Tsukada, H. Ito et al. // R&D Review of Toyota CRDL. 2003. Vol. 38, No. 2. P. 43–49.
14. Synopsis – Qt for Python [Electronic resource]. URL: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/PySide6/QtGui/QSinglePointEvent.html#PySide6.QtGui.QSinglePointEvent.position> (accessed: 07.05.2024).
15. Пат. RU 2 533 348 C1. Оптический способ измерения размеров и положения объекта и дальномер-пеленгатор / Гузевич С. Н. – № 2013130715/28 ; заявл. 04.07.2013 ; опубл. 20.11.2014 Бюл. № 32, 15 с.

## References

1. Hein G W. Status, perspectives and trends of satellite navigation. *Satellite Navigation*. 2020. Vol. 1, No. 1, P. 22.
2. Gundorov K. V., Sulejmanov V. N., Medvedkov D. A. [Analysis of the satellite system operation in the conditions of disconnection of the Russian Federation from the navigation systems of unfriendly countries]. *Vestnik voennogo innovacionnogo tehnopolisa "JeRA."*. 2023, Vol. 4, No. 2, P. 175–183 (In Russ.).
3. Litvin M. A., Maljugina A. A., Miller A. B. et al. [Types of errors in inertial navigation systems and methods of their approximation]. *Informacionnye process*. 2014, Vol. 14, No. 4, P. 326–339 (In Russ.).
4. Artjushin A. A., Kurbanov R. K., Marchenko L. A. et al. [Choosing a standard-sized range of unmanned aerial vehicles and payloads for monitoring agricultural fields]. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019, No. 4 (37), P. 36–43 (In Russ.).
5. Dodonov A. G., Putjatin V. G. [Ground optical, Optoelectronic and laser-television means of trajectory measurements]. *Matematicheskie mashiny i sistemy*. 2017, No. 4, P. 30–56 (In Russ.).
6. Mussabayev R. R., Kalimoldayev M. N., Amirgaliyev Ye. N. et al. Calculation of 3D Coordinates of a Point on the Basis of a Stereoscopic System. *Open Engineering. De Gruyter Open Access*. 2018. Vol. 8, No. 1, P. 109–117.
7. Enaleev S. F. [Trajectory measurements: a practical guide] *Traektornye izmereniya*. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2021, 124 p.

8. Gusev M. V. [The history of the development of trajectory optical measuring instruments]. *Matrica nauchnogo poznaniya*, 2023, No. 1-1, P. 57–65 (In Russ.).
9. Iskorkin D. V., Shishkov S. V., Terjoshin A. V. et al. Patent No. RU 2 645 549 C2. *Sposob opredeleniya koordinat letatel'nyh apparatov s ispol'zovaniem odnogo direkcionnogo ugla i dvuh uglov mesta* [A method for determining the coordinates of aircraft using one directional angle and two angles of location]. No. 2015114888. 2018.
10. Hager G. D., Belhumeur P. N. Real-time tracking of image regions with changes in geometry and illumination. *Proceedings CVPR IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1996. P. 403–410.
11. Rysenkov K. N., Vojchenko O. S., Zobov I. S. et al. Patent No. RU 2 758 860 C1. *Sposob korrekcii uglov vizirovaniya na tochku* [A method for correcting the angles of sight to a point]. No. 2020133299. 2021.
12. Ko J.-H., Kim E.-S. Stereoscopic video surveillance system for detection of target's 3D location coordinates and moving trajectories. *Optics Communications*. 2006, Vol. 266, No. 1, P. 67–79.
13. Matsubara H., Tsukada T., Ito H. et al. A three-dimensional position measurement method using two pan-tilt cameras. *R&D Review of Toyota CRDL*. 2003, Vol. 38, No. 2, P. 43–49.
14. Synopsis – Qt for Python. Available at: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/PySide6/QtGui/QSinglePointEvent.html#PySide6.QtGui.QSinglePointEvent.position> (accessed: 07.05.2024).
15. Guzevich S. N. Patent No. RU 2 533 348 C1. *Opticheskiiy sposob izmereniya razmerov i polozheniya obekta i dal'nomer-pelengator* [Optical method for measuring the size and position of an object and a range finder]. No. 2013130715/28. 2014.

© Никифоров Д. Л., Ефимов С. Н., 2024

---

**Никифоров Данил Леонидович** – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [nikiforov-danil1997@yandex.ru](mailto:nikiforov-danil1997@yandex.ru). <https://orcid.org/0009-0004-8238-3427>

**Ефимов Сергей Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [efimov@bk.ru](mailto:efimov@bk.ru). <https://orcid.org/0000-0002-4506-3510>

**Nikiforov Danil Leonidovich** – Postgraduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [nikiforov-danil1997@yandex.ru](mailto:nikiforov-danil1997@yandex.ru). <https://orcid.org/0009-0004-8238-3427>

**Efimov Sergey Nikolaevich** – Cand. Sc., assistant professor, department of informational and control systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [efimov@bk.ru](mailto:efimov@bk.ru). <https://orcid.org/0000-0002-4506-3510>

---

Статья поступила в редакцию 27.09.2024; принята к публикации 26.11.2024; опубликована 26.12.2024  
The article was submitted 27.09.2024; accepted for publication 26.11.2024; published 26.12.2024







АВИАЦИОННАЯ  
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ  
ТЕХНИКА

AVIATION  
AND SPACECRAFT  
ENGINEERING



УДК 004.94

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-442-453

**Для цитирования:** Виртуальная имитация пульта заправки современного гражданского самолёта / Т. Н. Иванилова, Е. В. Кузнецов, А. В. Кушнеров, А. В. Серегин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 442–453. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-442-453.

**For citation:** Ivanilova T. N., Kuznetsov E. V., Kushnerov A. V., Seregin A. V. [Virtual imitation of a fueling panel for modern civil airplane]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 442–453. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-442-453.

## Виртуальная имитация пульта заправки современного гражданского самолёта

Т. Н. Иванилова, Е. В. Кузнецов, А. В. Кушнеров, А. В. Серегин\*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: sear\_ring@mail.ru

*В работе рассмотрено проектирование и разработка компьютерной модели пульта контроля и управления заправкой топливом гражданского самолёта Sukhoi SuperJet 100.*

*В процессе проектирования представленной в статье виртуальной имитационной модели рассмотрены и отобраны компоненты заправочного пульта и системы заправки самолёта SSJ-100, достаточные для дальнейшей программной реализации. Отбор необходимых компонентов для модели проведён, используя метод декомпозиции реальной системы. Сначала были выбраны функциональные элементы непосредственно пульта заправки, после чего разобрана система заправки на компоненты, которые позволяют имитировать работу моделируемого пульта.*

*Для программной реализации имитационной модели были описаны программные классы объектов и взаимодействия между ними. Программные алгоритмы реализованы в среде Unity с использованием языка C#. Созданная программа использует трёхмерную графическую составляющую и собрана под запуск на web-браузере. Также разработаны программные компоненты, позволяющие изучать функции пульта заправки как самостоятельно, так и в режиме контроля знания элементов и алгоритмов работы с пультом заправки.*

*Представленная модель включена в программу-тренажёр для обучения технических специалистов навыкам обслуживания самолёта в условиях ограниченного доступа к реальному или аппаратному имитационному оборудованию и используется как часть практического тренажёра в СибГУ им. М. Ф. Решетнёва и может быть функционально расширена в дальнейшем.*

*Ключевые слова:* пульт заправки самолёта, компьютерная имитационная модель, виртуальный тренажёр.

## Virtual imitation of a fueling panel for modern civil airplane

T. N. Ivanilova, E. V. Kuznetsov, A. V. Kushnerov, A. V. Seregin\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: sear\_ring@mail.ru

*The article considers the design and development of a computer model of the fueling monitoring and control panel of the Sukhoi SuperJet 100 civil aircraft. The presented model is included in a simulator program for training technical specialists in aircraft maintenance skills under conditions of limited access to real or hardware-simulated equipment.*

*In the process of designing of the presented simulation model, the refueling panel and the SSJ-100 aircraft refueling system sufficient components were considered and selected for further software implementation. The selection of the necessary components for the model was carried out using the decomposition method of the real system. First, the functional elements of the refueling panel itself were selected, after which the refueling system was disassembled into components that allow simulating the operation of the simulated panel.*

*To implement the simulation model, software classes of objects and interactions between them were described. Software algorithms are implemented in the Unity environment using the C# language. The created program uses a three-dimensional graphic component and compiled for launching on a web browser. Software components have also been developed that allow studying the functions of the fueling panel both independently and in the mode of control of knowledge of the elements and algorithms for working with the fueling panel.*

*The developed model is used as part of a practical simulator at the Reshetnev Siberian State University, and can be functionally expanded in the future.*

*Keywords: airplane refueling panel, computer imitation model, virtual simulator.*

## **Введение**

В данной статье представлены результаты компьютерного моделирования пульта контроля и управления заправкой топливом гражданских самолётов SSJ-100 при наземном обслуживании. Использование реального оборудования для овладения первоначальными навыками техническим персоналом, обслуживающим самолет, может привести к поломкам и неисправностям, а в некоторых случаях может быть травмоопасным для неподготовленного специалиста, к тому же затратно и занимает рабочее время специалиста.

Поэтому актуальной задачей для решения данной проблемы является имитация оборудования гражданского воздушного судна, посредством реализации необходимых тренажёров. В данном случае возникает выбор между реализацией тренажёра на программно-аппаратном комплексе или полностью программном. Наиболее достоверный опыт работы будет получен на тренажёре, использующем аппаратные составляющие, схожие с реальной техникой. Но такой подход может уступать полностью виртуальному комплексу по следующим причинам [1; 2]:

- стоимость реального оборудования достаточно высокая;
- существует необходимость в содержании и поддержании работоспособности оборудования;
- для реального оборудования сложнее увеличить количество экземпляров в отличие от виртуального;
- в режиме дистанционного обучения потенциальный доступ к виртуальному оборудованию не теряется.

Поэтому целесообразным и оправданным решением можно считать полностью виртуальную реализацию тренажера. Более того, полностью виртуальные имитации уже зарекомендовали себя как полноценные средства изучения, исследования и контроля реальных систем в различных отраслях, включая авиационную и авиационно-техническую [3–8], а также могут быть визуально представлены для наглядной демонстрации их работы пользователю [5; 9].

## **Постановка задачи**

В данной работе будет рассмотрена виртуальная реализация непосредственно пульта контроля и управления заправкой и некоторых компонентов системы заправки самолёта, необходимых для имитации работы пульта. Элементы компьютерной модели разрабатываются в виде самостоятельных агентов, со своими функциями и переменными свойствами, которые в дальнейшем реализованы как классы объектов в программной среде.

В первую очередь рассмотрим составляющие пульта заправки самолёта SSJ-100. На нём можно выделить следующие элементы: тумблер включения питания, тумблер проверки индикатора

торов пульты, индикаторы состояния заправочной системы, тумблеры и индикаторы для управления автоматической заправкой, тумблеры и индикаторы для управления ручной заправкой, сливом и перекачкой топлива. Пользователь взаимодействует с этими элементами непосредственно, поэтому они должны быть реализованы в первую очередь.

Следующим этапом является реализация алгоритмов работы нескольких компонентов пульты, которые имитируют работу элементов реальной заправочной системы самолета [10]:

- топливные баки самолёта;
- клапаны заправки и слива топлива;
- система заправки топлива в самолёт и слива топлива;
- датчик требуемого количества топлива;
- система автоматической заправки самолёта;
- проверка световых индикаторов;
- подача электропитания на различные элементы пульты заправки при его включении.

Далее для компьютерной реализации необходимо создание полноценных трехмерных моделей для составляющих, с которыми взаимодействует пользователь.

И завершающим этапом должна быть разработка обучающих модулей для подготовки технического персонала посредством разработанной виртуальной модели.

Результатом компьютерной реализации пульты контроля и управления заправкой должно быть программное приложение, имитирующее работу пульты, доступное к использованию через глобальную или локальную сеть.

### Проектирование имитационной модели

Рассмотрим более подробно составляющие элементы пульты заправки топливом SSJ-100, в частности элементы, с которыми взаимодействует пользователь. Элементы пульты, которые были представлены в предыдущем разделе, можно разделить на три группы: переключательные тумблеры, числовые световые индикаторы и обычные световые индикаторы. В конструкции пульты заправки используются двух- и трёхпозиционные тумблеры, которые являются основными элементами подачи команд управления от оператора на систему заправки. При смене положения тумблера на системы пульты заправки посылается команда выполнить определённую процедуру. Выполняемая процедура зависит от того, какой тумблер отправил команду и в каком положении он находится. Световые индикаторы используются для отображения текущего состояния системы заправки пользователю. На числовых световых индикаторах отображаются количественные данные системы. Обычные световые индикаторы переключаются в зависимости от состояния качественных атрибутов системы. Общая схема данного взаимодействия представлена на рис. 1.



Рис. 1. Упрощённая модель взаимодействия пульты управления с системой заправки

Fig. 1. Simplified interaction model of control panel with the fueling system

Блок «Система заправки» необходимо разбить на составляющие элементы и их функции для имитации реальной заправочной системы (рис. 2). В имитации системы заправки используются следующие виртуальные аналоги перечисленных ранее компонентов:

- объекты топливных баков для записи и изменения количества топлива внутри самолёта;
- топливные клапаны, которые можно открывать и закрывать. Данные элементы используются для обозначения, какие топливные баки открыты для заправки и открыт ли клапан слива топлива;
- объект имитации переливания топлива в самолёт. Данный объект предназначен для расчётов скорости изменения количества топлива в баках в зависимости от открытых на данный момент клапанов, а также запуска и остановки процесса переливания топлива в самолёт;
- объект датчика требуемого количества топлива. Используется пользователем для указания системе автоматической заправки количества топлива, которое должно быть в баках самолёта;
- объект имитации системы автоматической заправки. Следит за количеством топлива в баках, открывает и закрывает клапаны, запускает и останавливает топливный поток через объект имитации переливания топлива;
- объект имитации проверки светоиндикаторов пульта заправки. Имеет два режима проверки: проверку всех индикаторов и проверку индикаторов датчиков. При запуске проверки соответствующие светоиндикаторы должны загореться, при отключении проверки светоиндикаторы должны вернуться в нормальное состояние;
- объект для имитации системы подачи питания. При отключенном питании элементы пульта заправки отключаются и не выполняют функции управления системой заправки при вводе пользователя. При включении питания элементы пульта работают нормально.

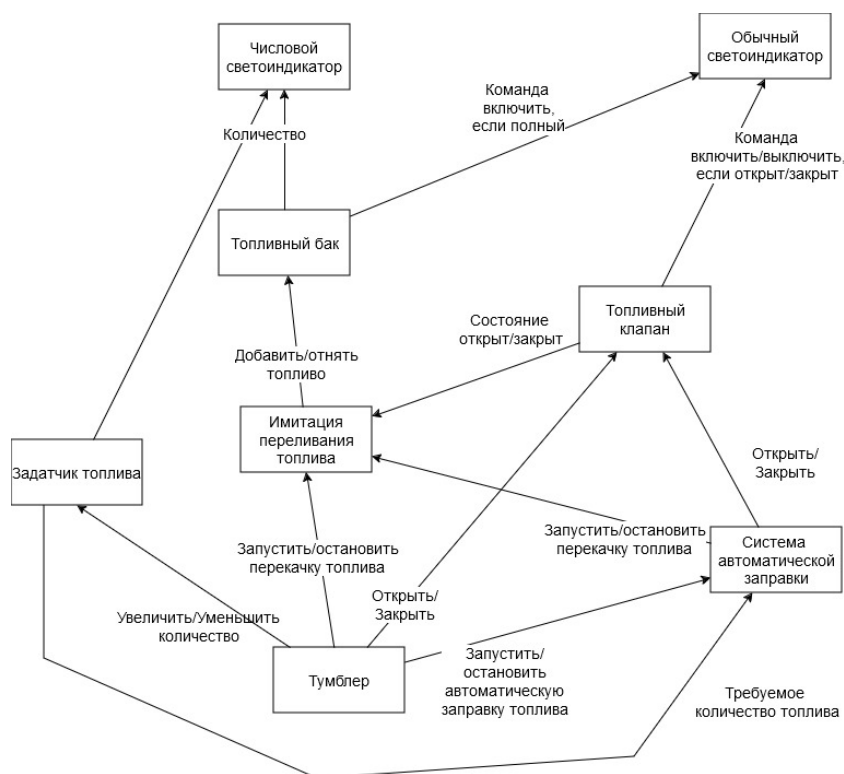


Рис. 2. Схема структуры и связей имитационной модели пульта заправки

Fig. 2. Diagram of structure and interactions of fueling panel imitation model

Также стоит учесть, что разрабатываемая программа должна содержать модули для обучения пользователя знаниям и навыкам работы с пультом управления и контроля заправки. Для упрощения обмена данными между функционально обособленными модулями целесообразно

использовать особый компонент-интерфейс, который позволяет обращаться к некоторым данным и функциям одного из модулей. Поэтому при реализации программы для системы заправки должен быть выбран и реализован такой компонент.

Представленные описания элементов и их связей в дальнейшем используются для выполнения программной реализации имитации пульта.

### **Программная реализация имитационной модели**

В качестве среды для создания виртуального тренажёра использовался программный продукт Unity, созданный компанией Unity Technologies [11]. Выбранное программное решение отлично подходит для моделирования агентных систем и визуальной демонстрации моделей [9]. Данная среда использует язык C# [12] для описания алгоритмов работы различных компонентов разрабатываемой программы и имеет возможность собрать готовое решение под web-платформу на язык JavaScript и с использованием графической библиотеки WebGL [13].

На основе выбранных функций и элементов для виртуального пульта заправки были спроектированы и разработаны следующие классы, имитирующие работу реальной системы контроля и управления заправкой:

- **NumericGauge** – числовые индикаторы, которые сохраняют переданное на него число и визуально отображают с помощью трёхмерных моделей сегментированных цифр, соответствующих реальному индикатору на пульте. Также данные объекты содержат методы для обеспечения функции тестирования светоиндикаторов пульта. При начале проверки индикатора устанавливается логическая переменная, которая заставляет индикаторы всех цифр полностью загораться, соответственно отображая числа из одних восьмёрок. При завершении тестирования числовые индикаторы отображают последнее переданное на них число;

- **Indicator** – световые индикаторы, которые могут быть включены и выключены командой от других объектов имитации. Переданное состояние хранится в переменной объекта и отображается, изменяя яркость материала на трёхмерной модели объекта. При начале тестирования светоиндикаторы загораются, при завершении тестирования – отображают последнее переданное на них состояние;

- **TumblerTwoWay** и **TumblerThreeWay** – классы, реализующие двух- и трёхпозиционные переключатели соответственно. Двухпозиционные переключатели изменяют своё положение при обычном нажатии мышкой. Трёхпозиционные изменяют положение при зажатии мыши и перемещении вверх вниз. При изменении своего положения на объекте переключателя срабатывает событие, соответствующее новому положению переключателя. К каждому из событий прикреплены различные методы и функции других объектов реализации имитации, которые запускаются при срабатывании событий. Функции и методы прикрепляются к событиям в зависимости от того, какому переключателю и его положению соответствует событие;

- **FuelTank** – класс, реализующий три топливных бака самолёта. Содержат данные о текущем, минимальном и максимальном количестве топлива и методы для добавления и вычитания текущего количества топлива в бак. При изменении количества топлива передают новое значение на соответствующие индикаторы пульта заправки;

- **FuelValve** – реализация топливных клапанов самолёта. Три клапана для закачки топлива в самолёт и один для слива топлива. Управляются двухпозиционными тумблерами и отображают состояние открыт/закрыт на обычные светоиндикаторы;

- **FuelFlow** – объект для имитации процессов переливания топлива в самолёт. Запускает и останавливает процесс переливания топлива при переключении соответствующего переключателя или по командам системы автоматической заправки. Выполняет различные операции переливания топлива в зависимости от открытых на данный момент топливных клапанов. Если открыты только клапаны топливных баков, то происходит закачивание топлива в соответствующие баки. Если открыт только клапан слива, то происходит слив топлива из самолёта. Другие конфигурации приводят к перекачиванию топлива из баков с закрытыми клапанами в баки с открытыми;

– PreselectFuel – объект управления задатчиком требуемого количества топлива. Хранит в себе требуемое количество топлива. Изменяет это количество при перемещении трёхпозиционного переключателя. Требуемое количество топлива отображается на числовом индикаторе на пульте;

– AutoFueling – класс, имитирующий работу системы автоматической заправки самолёта. Открывает клапаны и запускает имитацию переливания топлива, чтобы равномерно заполнить топливные баки до количества, указанного через задатчик;

– PowerSystem и IPower – классы, имитирующие подачу электропитания на различные элементы пульта заправки при его включении. IPower – интерфейс, содержащий методы для получения сигнала о том, что на элемент пульта подаётся питание. Этот интерфейс реализован на всех элементах пульта и изменяет переменную, обозначающую, что на данный элемент подаётся питание. При отсутствии питания на переключателях, на них не срабатывают события для управления системой заправки. При отсутствии питания на светоиндикаторах, они перестают отображать подаваемую на них информацию. Объект PowerSystem содержит в себе ссылки на все объекты, реализующие IPower, и подаёт команду на включение/выключение. Подача питания контролируется через единственный переключатель, который не управляется от PowerSystem;

– PanelTest – класс, который управляет проверкой работоспособности светоиндикаторов пульта. Может включить проверку на всех светоиндикаторах либо только тех, которые должны быть подключены к датчикам топливной системы. Управляется через трёхпозиционный переключатель;

– FuelSystem – класс-фасад [14], который ссылается на остальные классы системы подачи топлива и пульта заправки и используется для управления и извлечения данных о текущем состоянии системы заправки из единого интерфейса. Данный объект предназначен для упрощения доступа каких-либо других компонентов программы к данным и функция имитации пульта и топливной системы.

На рис. 3 представлено описание программной системы с помощью UML-диаграммы классов для вышеописанных классов.

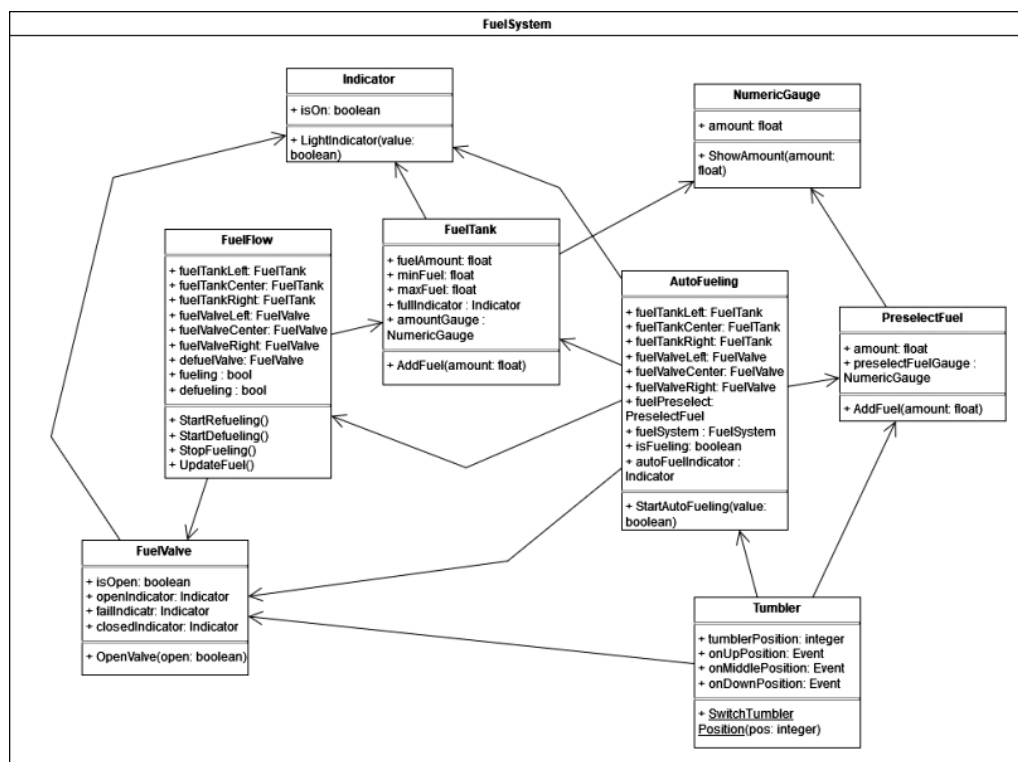


Рис. 3. Классовая UML схема имитации пульта заправки

Fig. 3. Class UML diagram of fueling panel imitation



Представленные компоненты были реализованы в виде программных алгоритмов на языке C# и прикреплены к объектам трёхмерной модели пульта контроля и управления заправкой топливом в среде Unity (рис. 4), для имитации его работы. Модели трёхмерных объектов были разработаны с использованием программы Blender, разработанной Blender Foundation [15].

На разработанной модели пульта можно проводить операции по ручной заправке (рис. 5), автоматической заправке (рис. 6), сливу топлива (рис. 7) и переливанию топлива между баками (рис. 8).

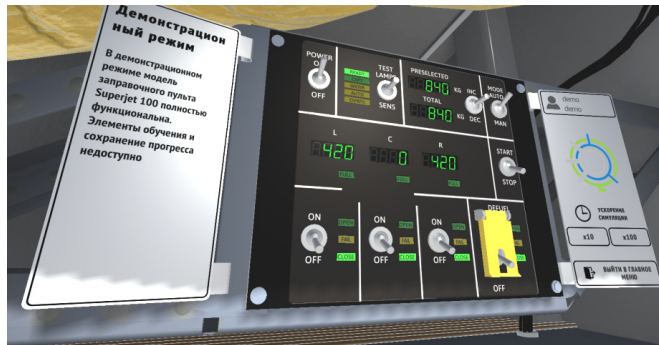


Рис. 4. Трёхмерная модель пульта заправки в программе

Fig. 4. 3D-model of fueling panel in program



Рис. 5. Шаги выполнения ручной заправки

Fig. 5. Manual refueling steps



Рис. 6. Шаги выполнения автоматической заправки

Fig. 6. Automatic refueling steps



Рис. 7. Шаги процедуры слива топлива

Fig. 7. Defueling procedure steps



Рис. 8. Шаги процедуры переливания топлива между баками

Fig. 8. Fuel transusion between tanks procedure steps

## Практическое применение

В настоящее время представленная имитационная модель используется в тренажёре «Пульт контроля и управления заправкой топлива Sukhoi Superjet 100» [16]. В данной программе содержатся программные компоненты для выполнения двух типов заданий: изучение элементов заправочного пульта и алгоритмы работы с пультом контроля и управления заправкой топлива. Каждый тип заданий содержит обучающий и проверочный режим.

Первый тип задания используется для изучения элементов пульта и их расположения. В обучающем режиме данного задания пользователь может нажать на каждый из элементов пульта, чтобы получить его описание. В проверочном режиме наоборот пользователю даётся описание элемента, который необходимо найти на пульте. Изучение элементов заправочного пульта происходит с помощью модуля изучения StudySystemManager (рис. 9). Данный класс отслеживает взаимодействие пользователя с объектами StdudyObject, которые прикреплены к соответствующим элементам трёхмерной модели пульта заправки. Обработка взаимодействий пользователя с этими объектами делегируется двум реализациям класса IStudySystem: одна для обучающего режима, другая для проверочного.

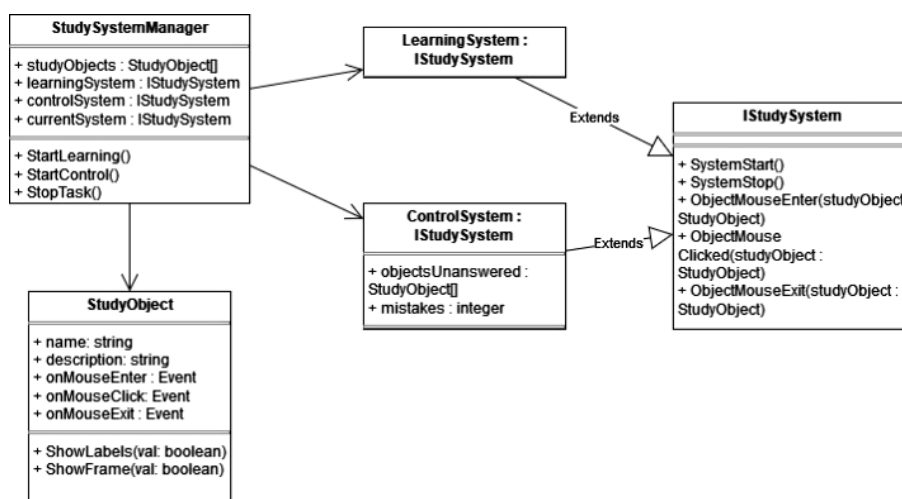


Рис. 9. Схема системы изучения элементов пульта заправки

Fig. 9. Fueling panel elements study system diagram

В заданиях на изучение алгоритмов пользователю предоставляется возможность сначала изучить различные алгоритмы заправки, слива и переливания топлива в самолёт, после чего контрольно выполнить эти алгоритмы с минимальным количеством пояснений. Для выполнения данных функций модуль изучения алгоритмов работ разбит на 4 типа объектов (рис. 10):

- TasksController используется для инициализации и завершения текущего задания и сбора данных о состоянии системы заправки через объект FuelSystem;

- TasksHolder – это объекты, которые соответствуют одному алгоритму работы с пультом (заданию). Содержат в себе перечень задач, необходимых для выполнения задания, а также методы управления ими;

- Task – одна из задач, которые необходимо пройти, чтобы выполнить алгоритм работы. Содержит перечень подзадач и методы управления и отображения выполнения задачи. Задача считается засчитанной, если выполнены все её подзадачи;

- TaskGoal – класс подзадачи, который содержит в себе название одной из переменных имитации топливной системы типа перечисления FieldName и её требуемое значение. Для разделения логики работы с различными переменными от данного класса произведены два других: BoolTaskGoal для логических переменных и FloatTaskGoal для числовых переменных. Объекты этого класса получают текущее значение переменной системы заправки через функции

GetBoolFieldByName для логических переменных и GetFloatFieldByName для вещественных из объекта FuelSystem. Далее подзадача помечается как выполненная, если требуемое значение переменной достигнуто внутри топливной системы и остаётся таковой в течение определенного промежутка времени.

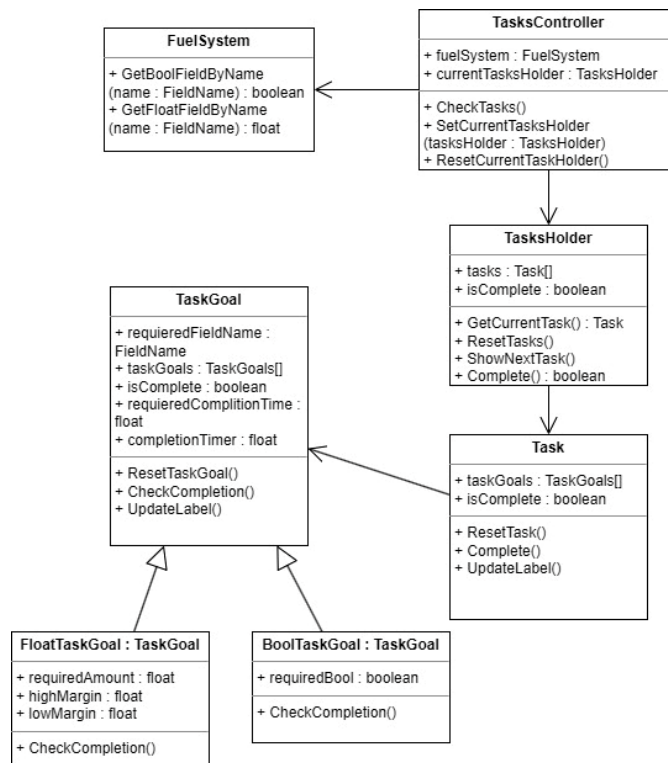


Рис. 10. Схема системы обучения алгоритмами работы с пультом

Fig. 10. Diagram of study system for fueling panel work algorithms

Представленный способ использования разработанной имитационной модели пульта заправки является одним из потенциально возможных. По необходимости программную модель можно доработать для выполнения других задач.

### Заключение

В работе рассмотрена виртуальная имитационная модель пульта контроля и управления заправкой самолёта Sukhoi Superjet 100. Проведено проектирование архитектуры системы, её компонентов и связей взаимодействия между ними. Согласно предложенной архитектуре, разработана программная реализация имитационной модели с использованием средств среды Unity под web-платформу. Данное программное решение выполнено в форме тренажёра, содержащего компоненты для изучения элементов и алгоритмов работы пульта заправки, а также контроля этих знаний. На данный момент разработанное решение используется в СибГУ им. М. Ф. Решетнева как виртуальный лабораторный практикум дисциплины «Горюче-смазочные материалы» для направления подготовки 25.03.01 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей». В дальнейшем представленную имитационную модель можно расширить для выполнения других задач.

### Библиографические ссылки

1. Дудырев Ф. Ф., Максименкова О. В. Симуляторы и тренажеры в профессиональном образовании: педагогические и технологические аспекты // Вопросы образования. 2020. № 3. С. 255–270.

2. Анализ использования виртуальных тренажеров в образовании / А. В. Ключиков, С. С. Елисеев, Ю. Н. Грепечук и др. // Проблемы и перспективы развития АПК: технические и сельскохозяйственные науки : материалы Региональной науч.-техн. конф. (13–17 февраля 2023, г. Саратов) / в авторской редакции ; ФГБОУ ВО Вавиловский ун-т, 2023. С. 97–103.
3. Козлова И. А., Смирнов Д. С. Сущность имитационного моделирования и перспективы его развития // Вестник науки. 2024. Т. 1, № 8 (77). С. 119–133.
4. Александрова А. В., Носов В. К. Цифровые технологии и инструментарий моделирования в создании авиационно-космической техники // Тенденции развития экономики и промышленности в условиях цифровизации : моногр. СПб., 2017. Гл. 5. § 5.1. С. 567–585.
5. Федоров А. С. Компьютерное проектирование шарнирно-рычажного механизма // Гении Подмоскovie : сб. науч. тр. по материалам фестиваля науки (28 ноября 2020, г. Москва). М. : Науч. кон-т, 2020. С. 190–202.
6. Максименко В. Г. Развитие подходов к проектированию авиационной техники на основе применения технологий компьютерного моделирования // Управление социально-экономическими системами: направления развития, вызовы и возможности : сб. материалов науч. сем. (26 апреля 2021, г. Таганрог). Таганрог : Юж.федер. ун-т, 2021. С. 23–26.
7. Еремин А. И., Лебедев Г. Н., Чехов И. А. Система автоматизированного предупреждения опасных ситуаций при заходе самолета на посадку перед началом снижения по глиссаде // Научный вестник Московского гос. технич. ун-та гражд. авиац. 2016. № 226(4). С. 90–100.
8. Имитационная модель радиолокационной обстановки интеллектуальной системы управления распределенными средствами радиолокационных станций / М. Б. Сергеев, А. А. Сенцов, Е. К. Григорьев и др. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 3(30). 1/17–17/17.
9. Мамонов А. А. Сравнительный анализ систем имитационного моделирования // Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем : материалы IX Междунар. науч. конф. (26–28 мая 2022, г. Томск) / под общ. ред. И. С. Шмырина ; Томский государственный университет, 2022. С. 282–289.
10. Sukhoi Superjet 100: руководство по технической эксплуатации RRJ-95. М. : ГСС, 2014. 872 с.
11. Движок Unity [Электронный ресурс]. URL: <https://unity.com/ru/products/unity-engine> (дата обращения: 23.10.2024).
12. Unity Manual WebGL [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/webgl.html> (дата обращения: 23.10.2024).
13. Руководство по программированию на C# [Электронный ресурс]. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/programming-guide/> (дата обращения: 23.10.2024).
14. Фасад (Facade) [Электронный ресурс] // Сайт о программировании METAINT.COM. 2015. URL: <https://metanit.com/sharp/patterns/4.3.php> (дата обращения: 23.10.2024).
15. Blender [Электронный ресурс]. URL: <https://www.blender.org/> (дата обращения: 23.10.2024).
16. Портал электронно-дистанционного обучения СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Web-тренажеры [Электронный ресурс]. URL: <https://el.sibsau.ru/page/three-d-simulators> (дата обращения: 23.10.2024).

## References

1. Dudyrev F. F., Maksimenkova O. V., [Simulators and training programs in professional education: pedagogical and technological aspects]. *Voprosy obrazovaniya*. 2020, No. 3, P. 255–270 (In Russ.).
2. Klyuchikov A. V., Eliseev S. S., Grepechuk Yu. N., Tsagareishvili M. R. [Analysis of the use of virtual simulators in education]. *Problemy i perspektivy razvitiya APK: tekhnicheskie i sel'skokhozyaystvennyye nauki : materialy regional'noy nauchno-tekhnicheskoy konf.* [Problems and develop-

ment perspectives of Industrial Agriculture : works of Reg. Sci-Prac. Conf.] Saratov, 2023, P. 97–103 (In Russ.).

3. Kozlova I. A., Smirnov D. S. [The essence of simulation modeling and prospects for its development]. *Vestnik nauki*. 2024, Vol. 1, No. 8 (77), P. 119–133 (In Russ.).

4. Aleksandrova A. V., Nosov V. K. [Digital technologies and instrumentation modeling in the creation of aviation and space technology]. *Tendentsii razvitiya ekonomiki i promyshlennosti v usloviyakh tsifrovizatsii*. 2017, P. 567–585. Doi 10.18720/IEP/2017.6/23.

5. Fedorov A. S. [Computer design of a hinge-lever mechanism]. *Genii Podmoskov'ya : Sbornik nauchnykh trudov po materialam festivala nauki* [Geniuses of science : Comp. of Sci. Proc. of Scientific Festival]. 2020, P. 190–202.

6. Maksimenko V. G. [Development of approaches to the design of aviation equipment based on the use of computer modeling technologies]. *Upravlenie sotsial'no-ekonomicheskimi sistemami : napravleniya razvitiya, vyzovy i vozmozhnosti : sbornik materialov nauchnogo seminara* [Management of socio-economic systems : directions of development, challenges and opportunities : collection of materials of a scientific seminar]. 2021, P. 23–26 (In Russ.).

7. Eremin A. I., Lebedev G. N., Chekhov I. A. [Automatic warning system for hazardous situations during aircraft approach to landing before the start of descent along the glide path]. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*. 2016, No. 226 (4), P. 90–100 (In Russ.).

8. Sergeev M. B., Sentsov A. A., Grigor'ev E. K., Nenashev S. A. [Simulation model of the radar environment of the intelligent control system of distributed means of radar stations]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii*. 2020, Vol. 8, No. 3(30) (In Russ.). Doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.038.

9. Mamonov A. A. [Comparative analysis of simulation modeling systems]. *Materialy IX mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Matematicheskoe i programmnoe obespechenie informatsionnykh, tekhnicheskikh i ekonomicheskikh sistem"* [Proc. 9th Inter. Sci. Conf. "Mathematics and software for information, technical and economic systems"]. Tomsk, 2022, P. 282–289 (In Russ.).

10. *Sukhoi Superjet 100 : rukovodstvo po tekhnicheskoy ekspluatatsii RRJ-95*. [Sukhoi Superjet 100: RRJ-95 technical operation manual]. Moscow, GSS Company Publ., 2014, 872 p.

11. Unity engine. Available at: <https://unity.com/ru/products/unity-engine> (accessed: 23.10.2024).

12. Unity Manual WebGL Available at: <https://docs.unity3d.com/Manual/webgl.html> (accessed: 23.10.2024).

13. C# documentation. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/> (accessed: 20.02.2024).

14. Facade Programming (In Russ.). Available at: <https://metanit.com/sharp/patterns/4.3.php> (accessed: 23.10.2024).

15. Blender. Available at: <https://www.blender.org/> (accessed: 23.10.2024).

16. *Portal elektronno-distantionnogo obucheniya SibGU im. M. F. Reshetneva. Web-trenazhery* [Digital distant education portal of Reshetnev Siberian State University] (In Russ.). Available at: <https://el.sibsau.ru/page/three-d-simulators> (accessed: 23.10.2024).

© Иванилова Т. Н., Кузнецов Е. В., Кушнеров А. В., Серегин А. В., 2024

**Иванилова Татьяна Николаевна** – кандидат технических наук, профессор кафедры прикладной математики, начальник управления информационно-коммуникационных образовательных технологий; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ivanilovatn@sibsau.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1202-6609>

**Кузнецов Евгений Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент, директор института гражданской авиации и таможенного дела; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kuznetsoff@sibsau.ru. <https://orcid.org/0009-0003-3999-4436>

**Кушнеров Алексей Владимирович** – заведующий сектором разработки мультимедийного контента, отдел разработки электронно-образовательных ресурсов, управление информационно-коммуникационных образовательных технологий; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kushnerov\_av@sibsau.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5384-6099>

**Серегин Александр Валерьевич** – магистр; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sear\_ring@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7047-2466>

**Ivanilova Tat'yana Nikolaevna** – Cand. Sc., Associate Professor, Head of Department of Information and Communication Technologies in Education; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ivanilovatn@sibsau.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1202-6609>

**Kuznetsov Evgeniy Valer'evich** – Cand. Sc., Associate Professor, Director of the Institute of Civil Aviation and Customs Affairs; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kuznetsoff@sibsau.ru. <https://orcid.org/0009-0003-3999-4436>

**Kushnerov Aleksey Vladimirovich** – Head of the Multimedia Educational Content Development Sector, Electronic Educational Resources Development Department, Department of Information and Communication Technologies in Education; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kushnerov\_av@sibsau.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5384-6099>

**Seregin Aleksandr Valer'evich** – Master's Degree Student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sear\_ring@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7047-2466>

---

Статья поступила в редакцию 02.11.2024; принята к публикации 11.11.2024; опубликована 26.12.2024

The article was submitted 02.11.2024; accepted for publication 11.11.2024; published 26.12.2024

УДК 528.2:629.73

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-454-463

**Для цитирования:** Казыкин А. А., Мусонов В. М. Оценка погрешностей измерения навигационно-посадочных параметров с использованием псевдоспутников // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 454–463. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-454-463.

**For citation:** Kazykin A. A., Musonov V. M. [Estimation of measurement errors of navigation and landing parameters using pseudosatellites]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 454–463. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-454-463.

## Оценка погрешностей измерения навигационно-посадочных параметров с использованием псевдоспутников

А. А. Казыкин\*, В. М. Мусонов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: kazykinr77@gmail.com

*В настоящий момент существенное количество региональных аэродромов не имеют достаточного места для наземного навигационного оборудования. Это может привести к нежелательным последствиям при посадке воздушного судна (ВС) при слабом визуальном контакте экипажа со взлётно-посадочной полосой (ВПП). Система псевдоспутников способна повысить безопасность полетов на этапе посадки в сложных метеорологических условиях на региональных аэродромах без использования индикатора на лобовом стекле (ILS) после оценки погрешностей навигационно-посадочных параметров. Система псевдоспутников может быть использована для повышения безопасности полётов на этапе посадки в сложных метеорологических условиях на региональных аэродромах. Эта система состоит из контрольно-корректирующей станции и псевдоспутников, которые работают в определённых частотных диапазонах.*

*При использовании этой системы на воздушном судне устанавливается плановый навигационный прибор ПНП-72, который выдаёт основную навигационную информацию с заданной точностью. Это позволяет пилотам использовать более точную информацию и выполнять безопасный заход на посадку и посадку ВС на ВПП даже при слабом визуальном контакте с ней.*

*Таким образом, использование системы псевдоспутников может помочь решить проблему недостаточного количества наземных навигационных средств на региональных аэродромах. Это позволит обеспечить более точное определение местоположения ВС и улучшить качество навигационной информации, предоставляемой экипажу.*

*Применение системы псевдоспутников может стать альтернативой использованию дорогостоящих и сложных систем ILS, особенно на небольших аэродромах, где установка таких систем может быть нецелесообразной или экономически невыгодной.*

*Однако для успешного внедрения и эксплуатации системы псевдоспутников необходимо провести дополнительные исследования и испытания, чтобы определить оптимальные параметры работы системы, а также разработать соответствующие нормативные документы и процедуры для обеспечения безопасности полётов.*

**Ключевые слова:** псевдоспутники, безопасность полетов, GPS-спутники, удаленные аэродромы, спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС.

## Estimation of measurement errors of navigation and landing parameters using pseudosatellites

A. A. Kazykin\*, V. M. Musonov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: kazykincr77@gmail.com

*At the moment, a significant number of regional airfields do not have sufficient space for ground navigation equipment, this can lead to undesirable consequences when landing an aircraft with weak visual contact of the crew with the runway (runway). The pseudo-satellite system is able to improve flight safety at the landing stage in difficult meteorological conditions at regional airfields without using ILS (indicator on the windshield), after evaluating errors in navigation and landing parameters. The pseudo-satellite system can be used to improve flight safety at the landing stage in difficult meteorological conditions at regional airfields. This system consists of a control and correction station and pseudo satellites that operate in certain frequency ranges.*

*When using this system, the PNP-72 scheduled navigation device is installed on the aircraft, which provides basic navigation information with a given accuracy. This allows pilots to use more accurate information and perform a safe approach and landing of aircraft on the runway, even with weak visual contact with it.*

*Thus, the use of a pseudo-satellite system at regional airfields can significantly improve flight safety at the landing stage, especially in difficult meteorological conditions when the use of ILS is impossible. The use of a pseudo-satellite system can also help solve the problem of an insufficient number of ground navigation aids at regional airfields. This will allow for a more accurate determination of the aircraft's location and improve the quality of navigation information provided to the crew.*

*The use of a pseudo-satellite system can become an alternative to the use of expensive and complex ILS systems, especially at small airfields where the installation of such systems may be impractical or economically unprofitable.*

*However, for the successful implementation and operation of the pseudo-satellite system, additional research and testing is necessary to determine the optimal parameters of the system, as well as to develop appropriate regulatory documents and procedures to ensure flight safety.*

*Keywords: pseudo-satellites, flight safety, GPS satellites, remote airfields, GLONASS satellite navigation systems.*

### Введение

Наземные псевдоспутники для навигации самолетов обычно называются наземными станциями дифференциальной коррекции (DGNSS) или базовыми станциями ГНСС (глобальной навигационной спутниковой системы). Они играют важную роль в повышении точности и надежности навигации в воздушном пространстве:

– работа наземных станций DGNSS. Наземные станции DGNSS располагаются на земной поверхности и оснащены высокоточными приемниками сигналов ГНСС (например, GPS, ГЛОНАСС). Эти станции непрерывно принимают сигналы от спутников и затем корректируют их для устранения ошибок, связанных с атмосферными и другими факторами, которые могут влиять на точность навигации;

– передача коррекций. Наземные станции передают коррекции в реальном времени через радиосвязь или сети данных в навигационные приемники, установленные на борту самолетов. Это позволяет самолетам уточнять свои координаты и улучшать точность навигации до нескольких сантиметров [1];

– повышение точности: Использование наземных станций DGNSS позволяет значительно повысить точность и надежность навигации в воздушном пространстве. Это особенно важно



для взлетов, посадок, подходов к аэропортам и других фаз полета, где точность играет решающую роль в безопасности [2];

– устранение эффекта ионосферы. Наземные станции DGNSS могут помочь устранить ошибки, вызванные ионосферой Земли, что может существенно улучшить точность навигации.

Решение задачи оптимизации и выбор методов её решения зависит от формирования целевой функции, а также используемого критерия оптимизации [3].

### Оптимизация размещения псевдоспутников

В основе выбора целевой функции лежит зависимость величины погрешностей измерения координат ВС от значений геометрического фактора (ГФ) [4]. Таким образом, точность определения навигационно-временных параметров с помощью спутниковых навигационных систем (СН) можно оценить через геометрические факторы (ГФ). Горизонтальный геометрический фактор HDOP позволяет определить точность определения горизонтальных координат (рис. 1), а чтобы оценить точность определения вертикальной координаты, т. е. высоты, используется вертикальный геометрический фактор VDOP (рис. 2).

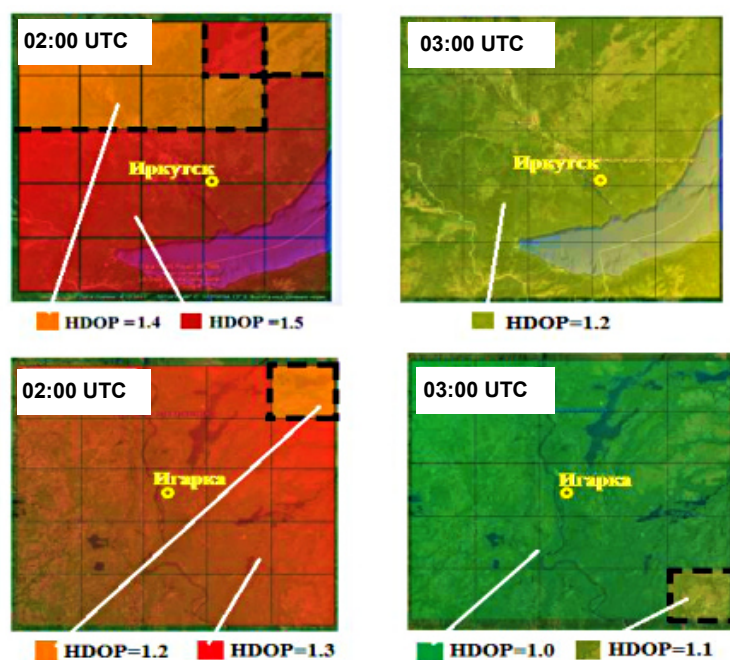


Рис. 1. Поле точности GPS по коэффициенту снижения точности в горизонтальной плоскости (HDOP)

Fig. 1. GPS accuracy field by the coefficient of accuracy reduction in the horizontal plane (HDOP)

Важно подчеркнуть, что применение псевдоспутников (ПС) оказывает значительное влияние на снижение вертикального геометрического фактора при решении навигационной задачи [5]. Так как на этапе посадки особенно важны строгие требования к точности определения высоты, ПС следует разместить таким образом, чтобы точность определения высоты была наилучшей на всём протяжении посадочной траектории [6]. Таким образом, в качестве целевой функции при решении задачи нахождения оптимального расположения ПС в районе аэродрома будем использовать среднее вдоль всей посадочной траектории значение вертикального ГФ VDOP:

$$VDOP_{\text{CP}}(B_{\text{ПС}}L_{\text{ПС}}H_{\text{ПС}}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $B_{\text{ПС}}L_{\text{ПС}}H_{\text{ПС}}$  – геодезические координаты ПС. Для большинства аэродромов посадку на ВПП можно проводить с двух противоположных посадочных курсов. Принимая во внимание этот фактор, ПС нужно расположить так, чтобы средний VDOP стал минимальным для обеих траек-

торий посадки, начиная с точек захода на глиссаду и заканчивая точками касания ВПП (рис. 3). Учитывая этот факт, выражение (1) примет вид:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VDOP_{CP} (B_{PC} L_{PC} H_{PC}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $n$  – количество точек посадочной траектории, в которых вычисляется ГФ. Принимая во внимание небольшие изменения ГФ в близлежащих точках, для вычисления среднего ГФ вдоль траектории посадки достаточно использовать 25–30 равномерно распределённых точек. Следовательно, оптимальным размещением ПС предлагается считать то, которое обеспечивает минимальное среднее значение  $VDOP_{CP}$  для всей траектории посадки, определённое выражением (2). Поскольку вследствие орбитального движения НС наблюдаются временные вариации геометрического фактора в районе аэродрома, то при решении задачи оптимизации используемое в качестве критерия среднее значение  $VDOP$  вдоль всей посадочной траектории должно учитывать и эту особенность. Выражение (2) примет вид:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VDOP_{CPI} (B_{PC} L_{PC} H_{PC}) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $i$  – момент времени, на который рассчитано среднее вдоль посадочной траектории значение  $VDOP$ .

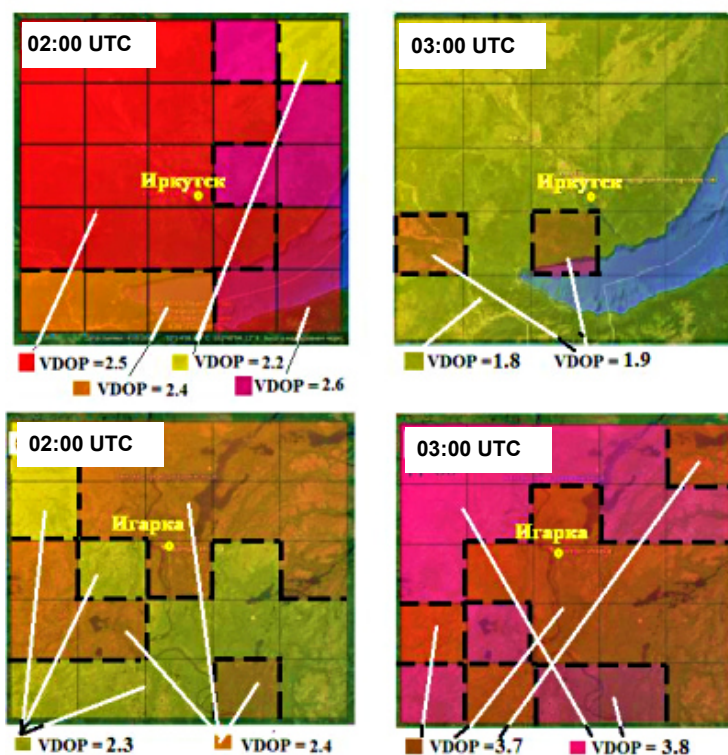


Рис. 2. Поле точности GPS по коэффициенту снижения точности в вертикальной плоскости (VDOP)

Fig. 2. GPS accuracy field by vertical plane accuracy reduction factor (VDOP)

Продолжительность полного цикла орбитального движения ГЛОНАСС составляет примерно восемь суток (691200 с). Так как временные изменения  $VDOP$  довольно медленные, для решения этой задачи достаточно выбирать временной интервал для расчёта  $VDOP$  около 10 мин (600 с). Чтобы учесть весь период повторяемости орбитальной структуры ГЛОНАСС, необходимо 691200 разделить на 600, что равно 1152 значениям [7].

Изучаются способы создания системы наземного оборудования для системы посадки и бортового оборудования ВС, а также методы высокоточной синхронизации нескольких псевдоспутников. Эта система представляет собой локальную систему посадки воздушных судов (ЛСПВС) [8]. В состав наземного оборудования ЛСПВС входят:

- опорная станция дифференциальной коррекции навигационных сигналов (КНС);
- передатчики ПС, сигнал которых модулирован дальномерным кодом;
- контрольный приемник, обеспечивающий проверку сигнала, излучаемого ПС, по нескольким критериям;
- мощность сигнала, сдвиг шкалы времени дальномерного кода, структура и содержание передаваемой цифровой информации.

Основные особенности представленного варианта построения наземного сегмента ЛСПВС:

- синхронизация шкал времени (ШВ) ПС непосредственно по выходным дальномерным радиосигналам ПС;
- совмещение функций контроля и синхронизации ПС;
- совмещение приемного устройства, обеспечивающего формирование дифференциальных поправок КНС с приемным устройством синхронизации ШВ ПС;
- управление задержкой дальномерного сигнала и излучаемой мощностью каждого ПС по локальной сети;
- использование в базовой станции высокостабильного опорного генератора (ОГ) для поддержания синхронизации с КНС при временном отсутствии приема сигналов НКА;
- максимальное уменьшение стоимости ПС для «безболезненного» увеличения их числа в ЛСПВС.

Структурная схема ЛСПВС представлена на рис. 3.

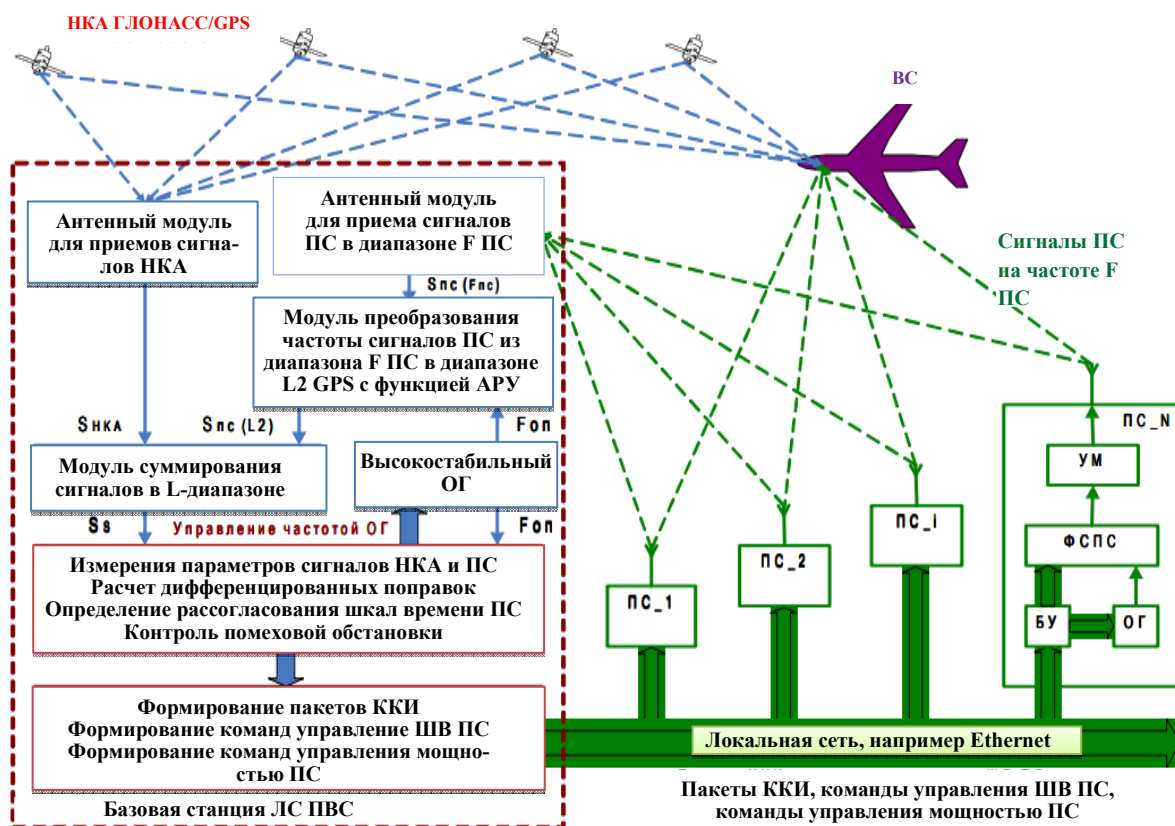


Рис. 3. Структурная схема ЛСПВС

Fig. 3. The block diagram of the LSPVS

Анализ показывает, что для обеспечения разделения излучений сигналов нескольких ПС, электромагнитной совместимости сигналов ПС с наземным оборудованием системы ЛСПВС, навигационным оборудованием ГЛОНАСС/GPS и бортовым оборудованием ВС, а также для достижения высокой точности измерения радионавигационных параметров (задержки доплеровского сдвига частоты, фазы и разности фаз сигналов несущей частоты), необходимо использовать для ПС сигналы, отличные от существующих сигналов КНС [9]. В частности, рекомендуется передавать сигналы ПС на несущей частоте, значительно отличающейся от частот сигналов НКА ГЛОНАСС/GPS, что обеспечит частотное разделение этих сигналов [10].

При выборе частотного диапазона сигнала ПС важно также учитывать расположение антенны для приёма сигналов ПС на борту воздушного судна. Существуют два варианта размещения антенны: в верхней и нижней части фюзеляжа [11].

### **Повышение точности навигации**

Общий результат использования наземных псевдоспутников для навигации самолетов – это значительное улучшение точности и безопасности полетов, что особенно важно в гражданской и военной авиации. Эта технология позволяет пилотам и автоматическим системам управления самолетами точно определять свое местоположение и следовать заданному маршруту с высокой степенью уверенности [12].

Наземные ПС повышают точность навигации путем предоставления дополнительных источников данных и коррекций для приемников GPS (или других спутниковых навигационных систем), что помогает улучшить точность позиционирования [13].

Наземные ПС размещаются в известных местах с известными координатами. Они могут наблюдать за сигналами от спутников и вычислять ошибки в этих сигналах, вызванные атмосферным воздействием или другими факторами [14]. Затем они передают эти коррекции на приемники GPS, которые используют их для улучшения точности позиционирования. Система дифференциального позиционирования (DGPS) использует станцию на земле, известную как базовая станция, которая измеряет ошибки в GPS-сигналах и отправляет коррекции на ПС (реальные GPS-спутники) и приемники на земле. Это позволяет улучшить точность позиционирования на конкретной территории.

Real-Time Kinematic (RTK): RTK – это метод, который также использует базовую станцию, но в этом случае коррекции передаются в режиме реального времени и приемник на земле может достичь очень высокой точности (до сантиметров) в позиционировании.

*Системы коррекции в реальном времени.* Существуют различные системы коррекции в реальном времени, такие как Wide Area Augmentation System (WAAS) в США или European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) в Европе. Они предоставляют коррекции сигналов GPS через спутники или наземные станции.

*Усиление сигнала GPS.* Для улучшения сигнала на конкретной территории можно использовать усилители сигнала GPS или распределенные антенны.

*Использование дополнительных сенсоров.* Для повышения точности позиционирования возможно использовать дополнительные сенсоры, такие как инерционные измерители (IMU) или магнитометры, чтобы компенсировать ошибки GPS [15].

*Локальные базы данных и карты.* Создание локальных баз данных о территории, включая информацию о преградах, зданиях и т. д., помогает в коррекции позиционирования.

*Распределение коррекций в реальном времени.* Наземные ПС передают коррекции в реальном времени на приемники GPS через сеть или радиоканал. Это позволяет обновлять информацию о коррекциях непрерывно и мгновенно учитывать изменения в атмосферных условиях или других факторах, влияющих на точность.

Чтобы улучшить точность навигации, наземные ПС могут интегрировать данные из различных источников, таких как геодезические измерения, информация о высоте, метеорологические данные и др.

Совокупность этих факторов позволяет наземным ПС увеличивать точность навигации и обеспечивать более надежное и точное позиционирование для приемников GPS и других навигационных систем.

Оптимальное количество ПС зависит от нескольких факторов, включая цели навигации, точность, надежность и степень уверенности в позиционировании. Важно понимать, что чем больше спутников используется в процессе позиционирования, тем выше вероятность достижения более точных результатов. Однако существует оптимальное количество спутников, которое можно использовать для обеспечения достаточной точности и надежности, а именно:

– минимальное количество спутников для 2D-позиционирования: для определения двумерной (широты и долготы) позиции требуется как минимум 3 видимых спутника. Это обеспечивает позиционирование на поверхности Земли;

– минимальное количество спутников для 3D-позиционирования: для трехмерного (широта, долгота и высота) позиционирования требуется как минимум 4 видимых спутника. Это три спутника для определения горизонтальной позиции и четвертый для высоты.

Для увеличения точности и надежности позиционирования рекомендуется использовать больше видимых спутников. Обычно, чем больше спутников, тем лучше [15].

Итак, оптимальное количество ПС зависит от конкретных требований задачи. В большинстве ситуаций более 4 видимых спутников обеспечивают хорошую точность, но авиации могут потребоваться дополнительные спутники для повышения надежности и точности позиционирования.

Проанализируем воздействие количества оптимально размещенных станций сети на параметры интегрированной навигационной системы в исследуемой области воздушного пространства вокруг аэродрома Байкит. При этом задача определения оптимальных позиций станций (рассматривалась возможность подключения до пяти станций) решалась поэтапно, т. е. после определения оптимальной позиции первой станции определялась оптимальная позиция второй станции, затем третьей и так далее. Полученные результаты показывают, что увеличение числа станций ведет к снижению среднего значения VDOP и диапазона его изменений.

В таблице приведены рассчитанные для момента времени 11:30 UTC 07.05.2021 г. значения среднего VDOP вдоль посадочной траектории как при отсутствии ПС (графа 2), так и при их различном количестве. Выбранный момент времени характеризуется одним из худших значений  $VDOP = 2$  в районе аэродрома Байкит на полном 8-суточном интервале работы ГЛОНАСС.

**VDOP при разном количестве ПС (Байкит)**

|                   | ГЛОНАСС | ГЛОН+1ПС | ГЛОН+2ПС | ГЛОН+3ПС | ГЛОН+4ПС | ГЛОН+5ПС |
|-------------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Средний VDOP      | 2       | 1,311    | 0,973    | 0,870    | 0,791    | 0,742    |
| Выигрыш без ПС, % | –       | 35       | 52       | 57       | 61       | 63       |

Согласно таблице, применение оптимизации размещения позволяет сократить VDOP следующим образом: при использовании одного ПС – на 35 %, двух ПС – на 52 %, трёх ПС – на 57 %, четырёх ПС – на 63 %. Дальнейшее увеличение количества ПС в сети не приводит к значительному улучшению вертикального геометрического фактора и точности определения высоты полёта ВС. Таким образом, хотя использование более четырёх ПС для повышения точности определения высоты полёта ВС нецелесообразно, это повышает надёжность системы.

## Заключение

Использование ПС в навигационно-посадочных системах позволяет повысить точность определения навигационных параметров и улучшить надёжность навигационного обеспечения. Применение таких систем особенно актуально для аэродромов с ограниченными возможностями наземной инфраструктуры и в сложных метеорологических условиях.

Использование псевдоспутников в навигационно-посадочных системах также способствует снижению зависимости от глобальных навигационных спутниковых систем, таких как GPS и ГЛОНАСС, и повышению автономности навигационного обеспечения.

## Библиографические ссылки

1. Исследование точностных характеристик наземной радионавигационной системы на основе псевдоспутников [Электронный ресурс]. URL: [https://infokosmo.ru/en/article/16748/issledovanie\\_tochnostnyh\\_harakteristik\\_nazemnoy\\_radionavigacionnoy\\_sistemy\\_na\\_osnove\\_psevdosputnikov\\_/?ysclid=lyfy3ln1ot593699423](https://infokosmo.ru/en/article/16748/issledovanie_tochnostnyh_harakteristik_nazemnoy_radionavigacionnoy_sistemy_na_osnove_psevdosputnikov_/?ysclid=lyfy3ln1ot593699423) (дата обращения: 15.04.2024).
2. Исследование точностных характеристик аппаратуры спутниковых радионавигационных систем воздушных судов в высоких широтах [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tochnostnyh-harakteristik-apparaty-sputnikovyyh-radionavigatsionnyh-sistem-vozdushnyh-sudov-v-vysokih-shirotah> (дата обращения: 15.04.2024).
3. Цуканов И. Р., Азман А. В. Решаемые проблемы, преимущества и перспективы развития стратосферных беспилотных летательных аппаратов // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2023. № 2. С. 6–7.
4. Навигационно-посадочный комплекс беспилотного летательного аппарата с использованием псевдоспутников [Электронный ресурс]. URL: [https://vestnik.rsreu.ru/ru/?option=com\\_content&view=article&id=1123:1995-4565-2021-77-36-42&catid=194:vypusk-77&ysclid=lyfy94y51q197080686\\_lyfy7jnavy732330790](https://vestnik.rsreu.ru/ru/?option=com_content&view=article&id=1123:1995-4565-2021-77-36-42&catid=194:vypusk-77&ysclid=lyfy94y51q197080686_lyfy7jnavy732330790) (дата обращения: 17.04.2024).
5. Методика выбора конфигурации наземных базовых станций локальной навигационной системы для обеспечения наименьшей погрешности навигационных определений / А. Б. Гладышев, М. А. Голубятников, В. Н. Ратушняк, Д. Д. Кликно // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2023. № 7. С. 4–5.
6. Исследование параметров и расчет бюджета радиолинии в наземной системе ближней навигации на основе псевдоспутников [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-parametrov-i-raschet-byudzheta-radiolinii-v-nazemnoy-sisteme-blizhney-navigatsii-na-osnove-psevdosputnikov> (дата обращения: 18.04.2024).
7. Агаев Ф. Г., Асадов Х. Г., Асланова Ф. Б. Много функциональные беспилотные летательные аппараты. Оптимизация и синтез с учетом воздействия шумов // Тр. МАИ. 2021. № 117. С. 5–6.
8. Погосян М. А., Вережкин А. А. Системы автоматической посадки летательных аппаратов: аналитический обзор. Информационное обеспечение // Тр. МАИ. 2020. № 113. С. 5.
9. Алгоритм оптимизации размещения псевдоспутников методом нелдера-мида / С. А. Якушенко, С. О. Бурлаков, В. Е. Егрюшев и др. // Международный журнал гуманитар. и естеств. наук. 2022. № 3-2. С. 6.
10. Трусфус М. В., Абдуллин И. Н. Алгоритм обнаружения маркерных изображений для вертикальной посадки беспилотного летательного аппарата // Тр. МАИ. 2021. № 116. С. 7.
11. Математические основы фрактально-скейлингового метода в статистической радиофизике и приложениях [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-osnovy-fraktalno-skeylingovogo-metoda-v-statisticheskoy-radiofizike-i-prilozheniyah> (дата обращения: 21.04.2024).
12. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения: 21.04.2024).
13. Глобальный Аэронавигационный план [Электронный ресурс]. URL: [https://studylib.ru/doc/2110923/global\\_nyj-ae-ronavigacionnoj-plan-na-2013-2028-gg](https://studylib.ru/doc/2110923/global_nyj-ae-ronavigacionnoj-plan-na-2013-2028-gg) (дата обращения: 22.04.2024).



14. Инструкция по использованию глобальной навигационной спутниковой системы в гражданской авиации [Электронный ресурс]. URL: [https://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=17850](https://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=17850) (дата обращения: 23.04.2024).

15. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations [Электронный ресурс]. URL: [http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about\\_bca/pdf/statsum](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum) (дата обращения: 24.04.2024).

## References

1. *Issledovaniye tochnostnykh kharakteristik nazemnoy radionavigatsionnoy sistemy na osnove psevdosputnikov* [Investigation of the accuracy characteristics of a ground-based radio navigation system based on pseudosatellites] *Issledovaniye tochnostnykh kharakteristik nazemnoy radionavigatsionnoy sistemy na osnove psevdosputnikov*. Available at: [https://infokosmo.ru/en/article/16748/issledovanie\\_tochnostnykh\\_kharakteristik\\_nazemnoy\\_radionavigatsionnoy\\_sistemy\\_na\\_osnove\\_psevdosputnikov/?ysclid=lyfy3ln1ot593699423](https://infokosmo.ru/en/article/16748/issledovanie_tochnostnykh_kharakteristik_nazemnoy_radionavigatsionnoy_sistemy_na_osnove_psevdosputnikov/?ysclid=lyfy3ln1ot593699423) (accessed: 15.04.2024).

2. *Issledovaniye tochnostnykh kharakteristik nazemnoy radionavigatsionnoy sistemy na osnove psevdosputnikov* [Investigation of the accuracy characteristics of the equipment of satellite radio navigation systems of aircraft at high latitudes]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tochnostnykh-kharakteristik-apparatury-sputnikovyyh-radionavigatsionnykh-sistem-vozdushnykh-sudov-v-vysokih-shirotah> (accessed: 15.04.2024).

3. Tsukanov I. R., Azman A. V. [Estimation of errors in measuring navigation parameters in a near-range navigation system based on pseudosatellites]. *Izv. TuLGU. Tekhnicheskiye nauki*. 2023, No. 2, P. 6–7 (In Russ.).

4. *Navigatsionno-posadochnyy kompleks bespilotnogo letatel'nogo apparata s ispol'zovaniyem psevdosputnikov* [Navigation and landing complex of an unmanned aerial vehicle using pseudosatellites]. Available at: [https://vestnik.rsreu.ru/ru/?option=com\\_content&view=article&id=1123:1995-4565-2021-77-36-42&catid=194:vypusk-77&ysclid=lyfy94y51q197080686lyfy7jnavy732330790](https://vestnik.rsreu.ru/ru/?option=com_content&view=article&id=1123:1995-4565-2021-77-36-42&catid=194:vypusk-77&ysclid=lyfy94y51q197080686lyfy7jnavy732330790) (accessed: 17.04.2024).

5. Gladyshev A. B., Golubyatnikov M. A., Ratushnyak V. N., Klikno D. D. [The method of selecting the configuration of ground base stations of the local navigation system to ensure the least error in navigation definitions]. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii*. 2023, no. 7, p. 4-5 (In Russ.).

6. *Issledovaniye parametrov i raschet byudzheta radiolinii v nazemnoy sisteme blizhney navigatsii na osnove psevdosputnikov* [Investigation of parameters and calculation of the radio line budget in a ground-based near-range navigation system based on pseudosatellites]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-parametrov-i-raschet-byudzheta-radiolinii-v-nazemnoy-sisteme-blizhney-navigatsii-na-osnove-psevdosputnikov> (accessed: 18.04.2024).

7. Agaev F. G., Asadov H. G., Aslanova F. B. [Multi-functional unmanned aerial vehicles. Optimization and synthesis taking into account the effects of noise]. *Tr. MAI*. 2021, No. 117, P. 5–6 (In Russ.).

8. Poghosyan M. A., Vereykin A. A. [Aircraft automatic landing systems: an analytical review. Information support]. *Tr. MAI*. 2020, No. 113, P. 5 (In Russ.).

9. Yakushenko S. A., Burlakov S. O., Yegrushev V. E. et al. [Algorithm for optimizing the placement of pseudosatellites by the Nelder-meade method]. *Mezhdunar. zhurnal gumanit. i yestestv. nauk*. 2022, No. 3-2, P. 6 (In Russ.).

10. Trusfus M. V., Abdullin I. N. [Marker image detection algorithm for vertical landing of an unmanned aerial vehicle]. *Tr. MAI*. 2021, No. 116, P. 7 (In Russ.).

11. *Matematicheskiye osnovy fraktal'no-skeylingovogo metoda v statisticheskoy radiofizike i prilozheniyakh* [Mathematical foundations of the fractal scaling method in statistical radiophysics and applications]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-osnovy-fraktalno-skeylingovogo-metoda-v-statisticheskoy-radiofizike-i-prilozheniyakh> (accessed: 21.04.2024).

12. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki* [Federal State Statistics Service]. Available at: <http://www.gks.ru> (accessed: 20.04.2024).

13. *Global'nyy Aeronavigatsionnoy plan* [Global Air Navigation Plan]. Available at: [https://studylib.ru/doc/2110923/global\\_nyj-ae-ronavigacionnoj-plan-na-2013-2028-gg](https://studylib.ru/doc/2110923/global_nyj-ae-ronavigacionnoj-plan-na-2013-2028-gg) (accessed: 20.04.2024).
14. *Instruktsiya po ispol'zovaniyu global'noy navigatsionnoy sputnikovoy sistemy v grazhdanskoj aviatsii* [Instructions for using the global navigation satellite system in civil aviation]. Available at: [https://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=17850](https://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=17850) (accessed: 21.04.2024).
15. *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations* [Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations]. Available at: [http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about\\_bca/pdf/statsum](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum) (accessed: 21.04.2024).

© Казыкин А. А., Мусонов В. М., 2024

---

**Казыкин Андрей Александрович** – аспирант; институт гражданской авиации и таможенного дела, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [kazykincr77@gmail.com](mailto:kazykincr77@gmail.com). <https://orcid.org/0009-0007-4900-0828>

**Мусонов Владимир Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, профессор; институт гражданской авиации и таможенного дела, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [musonov\\_vm@mail.ru](mailto:musonov_vm@mail.ru)

**Kazykin Andrey Alexandrovich** – postgraduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [kazykincr77@gmail.com](mailto:kazykincr77@gmail.com). <https://orcid.org/0009-0007-4900-0828>

**Musonov Vladimir Mikhailovich** – Cand. Sc., Associate Professor, Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [musonov\\_vm@mail.ru](mailto:musonov_vm@mail.ru).

---

Статья поступила в редакцию 04.07.2024; принята к публикации 09.10.2024; опубликована 26.12.2024  
The article was submitted 04.07.2024; accepted for publication 09.10.2024; published 26.12.2024



УДК 539.3

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-464-481

**Для цитирования:** Нестеров В. А., Габидулин С. В. Исследование жесткости композитной спицы зонтичной антенны космического аппарата // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 464–481. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-464-481.

**For citation:** Nesterov V. A., Gabidulin S. V. [Design of a flexible spoke for a spacecraft umbrella antenna]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 464–481. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-464-481.

## Исследование жесткости композитной спицы зонтичной антенны космического аппарата

В. А. Нестеров\*, С. В. Габидулин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: nesterov@mail.sibsau.ru

*Антенны зонтичного типа часто применяются в современных космических аппаратах. Их преимущество состоит в возможности компактного размещения во время вывода на орбиту. При этом они должны обеспечивать необходимую стабильность в развернутом виде в космосе. Жесткость антенны главным образом зависит от жесткости спиц, проектирование которых выливается в комплексную задачу научного поиска. Антенны космических аппаратов должны обеспечивать функциональную работоспособность и в то же время обладать минимальной массой. Кардинальное направление совершенствования космических антенн состоит в применении новых конструкционных материалов. Композиты отличаются высокими удельными механическими свойствами, что позволяют создавать конструкции с высокой степенью весового совершенства. Проблема связана с наличием большого количества проектных параметров, сложным образом влияющих на работоспособность композитных конструкций. Определение оптимального сочетания этих параметров для каждой конструкции и конкретного расчетного случая приводит к необходимости проведения комплексного численного эксперимента, базирующегося на специализированных алгоритмах, методиках и программах.*

*Целью исследования является проектирование композитной спицы зонтичной антенны космического аппарата, обеспечивающей требуемую несущую способность и максимальную жесткость при заданном ограничении массы конструкции. Оно предполагает разработку конечно-элементных моделей композитной спицы различного исполнения, в которых была бы заложена возможность оптимизации проектных параметров по критериям прочности, несущей способности и жесткости. В результате численного эксперимента определяются способы повышения несущей способности и жесткости разворачиваемой антенны космического аппарата.*

*Ключевые слова:* спица зонтичной антенны, композиционные материалы, МКЭ.

## Design of a flexible spoke for a spacecraft umbrella antenna

V. A. Nesterov\*, S. V. Gabidulin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: nesterov@mail.sibsau.ru

*Umbrella type antennas are often used in modern spacecraft. Their advantage is the possibility of compact placement during orbital insertion. At the same time, they must provide the necessary stability when*

deployed in space. Antenna stiffness mainly depends on the stiffness of the spokes, the design of which is a complex task of scientific research. Spacecraft antennas must provide functional performance and, at the same time, have a minimum mass. The cardinal direction of improvement of space antennas consists in application of new structural materials. Composites are characterized by high specific mechanical properties, which allow to create structures with a high degree of weight perfection. The problem is related to the presence of a large number of design parameters that affect the performance of composite structures in a complex way. Determining the optimal combination of these parameters for each structure and a particular design case leads to the need for a complex numerical experiment based on specialized algorithms, methods and programs.

The aim of the study is to design a composite spoke for the umbrella antenna of a spacecraft, providing the required load-bearing capacity and maximum stiffness at a given mass limit of the structure. It involves the development of finite element models of the composite spoke of various designs, which would include the possibility of optimizing the design parameters by the criteria of strength, load-bearing capacity and stiffness. As a result of numerical experiment, the ways of increasing the bearing capacity and stiffness of the deployed spacecraft antenna are determined.

*Keywords: Umbrella antenna spoke, composite materials, FEM.*

## **Введение**

Для обеспечения качественной спутниковой связи требуется задействовать антенны большого диаметра. Ввиду пространственных ограничений ракетносителя такие антенны могут быть исполнены только в виде трансформируемых конструкций, одним из вариантов которых является антенна зонтичного типа. Главными требованиями к зонтичным антеннам выступают надежность системы раскрытия и обеспечение высокой точности формы отражающей поверхности рефлектора, которая теоретически должна представлять собой идеальный параболоид вращения. Практическая точность формы рефлектора определяется системой радиальных спиц, которые в развернутом состоянии должны обеспечивать требуемую жесткость, а на этапе вывода на орбиту – устойчивость и прочность конструкции. Вместе с этим должно выполняться и базовое требование, предъявляемое к элементам РКТ, – высокие функциональные возможности при минимуме их массы. Последнее обстоятельство, с одной стороны, обусловило широкое использование композиционных материалов, обладающих высокими удельными механическими характеристиками, с другой – значительно усложнило процедуру оптимального проектирования композитных конструкций из-за возросшего количества варьируемых проектных параметров, влияющих на функционирование этих конструкций, и из-за особенностей поведения самого композита.

При анализе сложных композитных конструкций, таких как спутниковые антенны и антенны космических аппаратов, следует иметь в виду и теоретические изыскания о способах моделирования композита [1–3], и накопленный опыт при проектировании и производстве непосредственно трансформируемых антенн зонтичного типа [4–15].

Проектирование спицы зонтичной антенны – сама по себе сложная многоэтапная задача. В нашей работе сконцентрировано внимание на обеспечении максимально возможной жесткости антенны в развернутом состоянии на орбите.

Работа носит теоретический характер прикладного назначения. В ее основе – численное исследование влияния разнообразных факторов на жесткостные параметры композитной спицы зонтичной антенны. Исследование предполагает выполнение многочисленных расчетов в среде интегрированного пакета КЭ программ COSMOS/M, качество анализа в котором зависит от точности выполнения геометрического и КЭ моделирования спицы с возможностью учета в них реальных особенностей конструкции и свойств объекта.

## **Исследование спицы эллиптического сечения**

В настоящей работе будем иметь в виду результаты предыдущего исследования, выполненного авторами для гибкой спицы зонтичной антенны. В нем получены значения (табл. 1) частот

собственных колебаний для двух первых мод, соответствующих консольным изгибным колебаниям спицы относительно вертикальной ( $Y$ ) и горизонтальной ( $Z$ ) осей (рис. 1). Данные соответствуют моделям со ступенчато переменной толщиной элементов (табл. 1). Они свидетельствуют о том, что усиление элементов, прилегающих к закрепленному концу, заметно повышает жесткость спицы.

Выполним модальный расчет сплошной композитной спицы эллиптического сечения (рис. 1) высотой 200 мм и шириной 90 мм с учетом веса сектора полотна (рис. 2). Результаты соответствуют моделям (без утяжеления) с различными значениями толщин оболочечных элементов (табл. 2). По ним видно, что из моделей двух видов с постоянной толщиной элементов сопоставимых масс (№ 1 из табл. 1 и № 2 из табл. 2) преимущество имеет спица эллиптического сечения, причем по первой частоте почти в 2 раза.

Таблица 1

Значения первых собственных частот в модели с переменной толщиной элементов

| Вариант | Толщина $h_s$ , мм | Первая частота, $f_1$ , Гц | Вторая частота, $f_2$ , Гц | Масса, кг |
|---------|--------------------|----------------------------|----------------------------|-----------|
| 1       | 0,60               | 2,11                       | 7,05                       | 1,658     |
| 2       | 0,48               | 2,41                       | 7,88                       | 1,650     |
| 3       | 0,36               | 2,76                       | 8,83                       | 1,642     |
| 4       | 0,24               | 3,19                       | 9,96                       | 1,634     |
| 5       | 0,12               | 3,75                       | 11,39                      | 1,627     |
| 6       | 0,00               | 4,56                       | 13,31                      | 1,619     |



Рис. 1. Спица с эллиптическим поперечным сечением

Fig. 1. Spoke with elliptical cross section

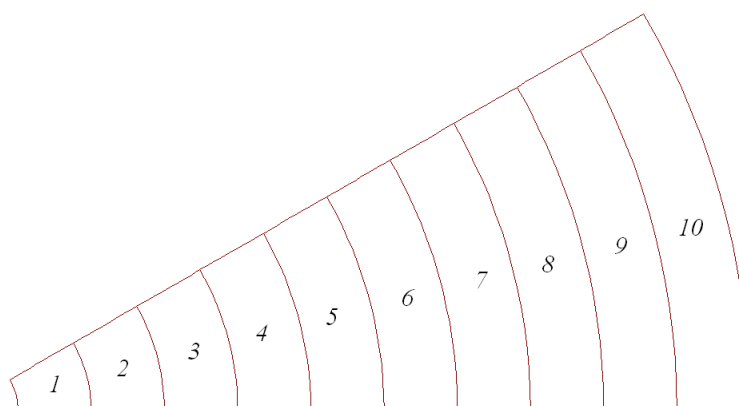


Рис. 2. Сектор полотна в 30°

Fig. 2. Sector of the canvas at 30°

Таблица 2

Значения первых частот колебаний спицы эллиптического сечения без учета массы полотна

| № | Толщина элементов, мм | Масса спицы, кг | Первая частота, Гц | Вторая частота, Гц |
|---|-----------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 0,24                  | 1,026           | 3,767              | 6,960              |
| 2 | 0,36                  | 1,540           | 3,898              | 7,117              |
| 3 | 0,48                  | 2,053           | 3,953              | 7,180              |

Добавим элементы сосредоточенной массы MASS вдоль верхней образующей спицы (рис. 3).

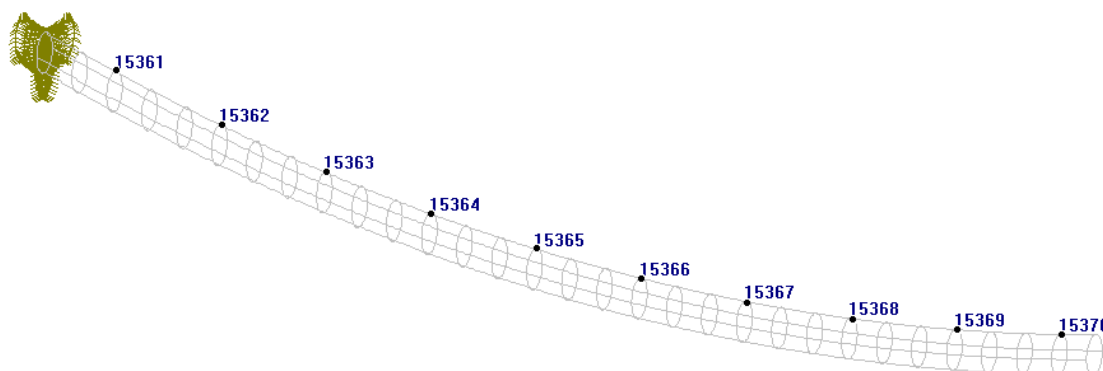


Рис. 3. Местоположение элементов сосредоточенной массы, имитирующих полотно

Fig. 3. Location of concentrated mass elements simulating canvas

Значения инерционных параметров в этих элементах (табл. 3) равны массам полос полотна соответствующих зон сектора (см. рис. 2).

Таблица 3

Массы секторов полотна

| Номер сектора | Площадь сектора, м <sup>2</sup> | Масса сектора, г | Номер сектора | Площадь сектора, м <sup>2</sup> | Масса сектора, г |
|---------------|---------------------------------|------------------|---------------|---------------------------------|------------------|
| 1             | 0,2514                          | 68,48            | 6             | 1,2383                          | 337,31           |
| 2             | 0,4411                          | 120,16           | 7             | 1,4537                          | 395,99           |
| 3             | 0,6333                          | 172,51           | 8             | 1,6779                          | 457,06           |
| 4             | 0,8294                          | 225,93           | 9             | 1,9119                          | 520,80           |
| 5             | 1,0306                          | 280,74           | 10            | 2,1566                          | 587,46           |

Величины частот собственных колебаний спицы уменьшаются (табл. 4) за счет инерционного влияния массы полотна. Отметим, что частота первой моды (рис. 4) заметно выше, чем в аналогичном случае для базовой модели (1,065 Гц). Частота вертикального колебания (рис. 5) для толщин оболочечных элементов от 0,36 до 0,48 мм почти такая же, как в базовой модели (3,602 Гц).

Таблица 4

Значения первых частот колебаний спицы эллиптического сечения с учетом массы полотна

| № | Толщина элементов, мм | Масса спицы, кг | Первая частота, Гц | Вторая частота, Гц |
|---|-----------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 0,24                  | 1,026           | 1,527              | 2,789              |
| 2 | 0,36                  | 1,540           | 1,861              | 3,358              |
| 3 | 0,48                  | 2,053           | 2,102              | 3,774              |

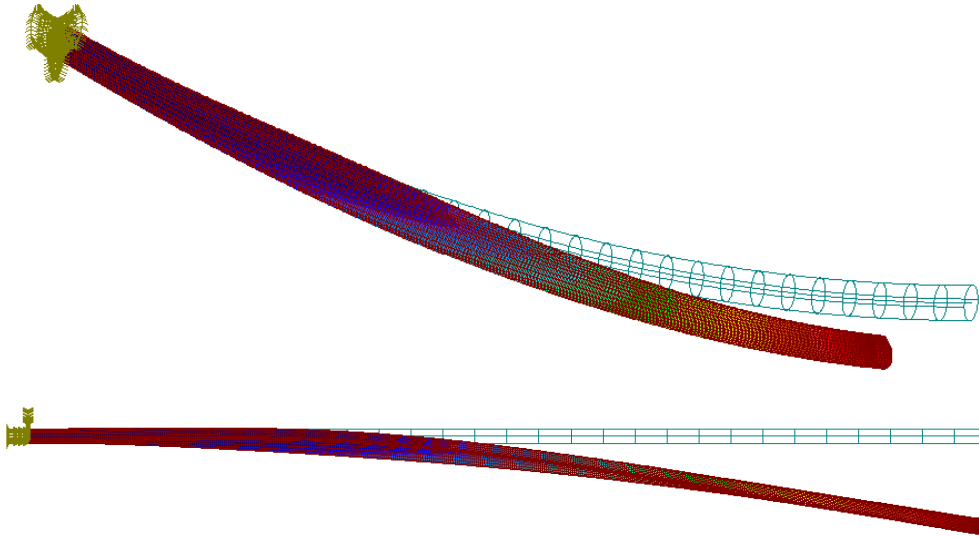


Рис. 4. Первая форма колебаний (внизу – вид сверху)

Fig. 4. First vibration mode (below – top view)

Эти значения собственных колебаний (см. табл. 4) соответствуют квазиизотропной модели с углом ориентации волокон в композите  $\varphi = 45^\circ$ . При изменении угла армирования исследуемые частоты можно увеличить. Об этом свидетельствуют результаты численного эксперимента (табл. 5), выполненного для спицы эллиптического сечения с толщиной стенки 0,36 мм. Отметим, что на интервале изменения угла  $\varphi$  от  $45^\circ$  и ниже имеются максимумы значений частот колебаний по двум первым модам, которые при необходимости можно уточнить. Однако и по имеющимся данным заметно, что частота первой моды примерно в 2,2 раза выше, чем у исходного варианта базовой модели (рис. 6).

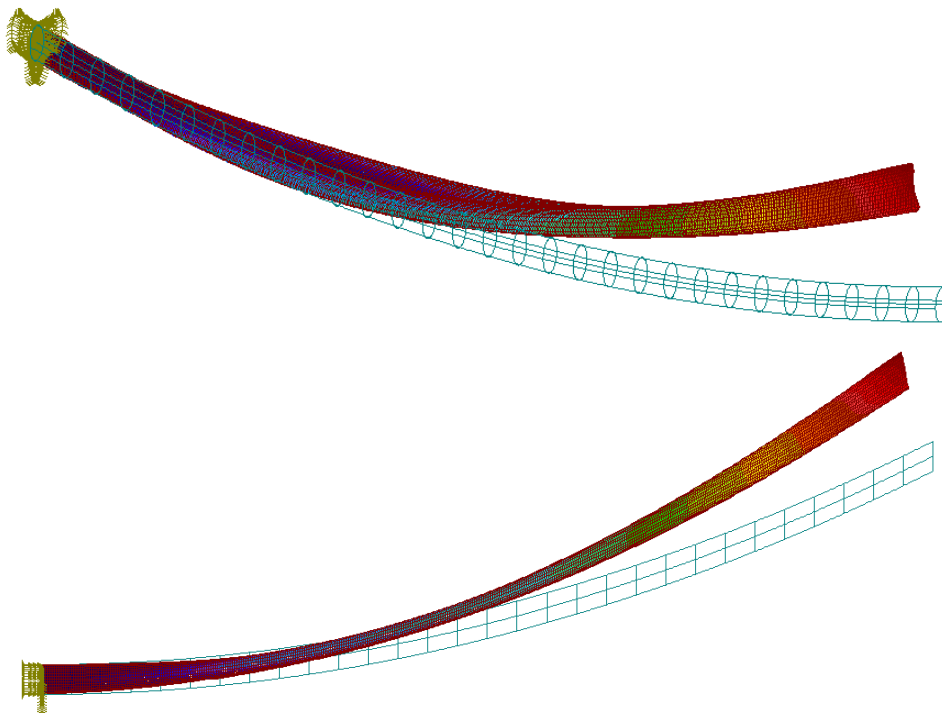


Рис. 5. Вторая форма колебаний (внизу – вид сбоку)

Fig. 5. Second vibration mode (below - side view)

Таблица 5

**Величины первых частот колебаний спицы эллиптического сечения с различными значениями углов намотки композитного волокна**

| № | Толщина элементов, мм | Угол армирования $\varphi$ , град | Первая частота, Гц | Вторая частота, Гц |
|---|-----------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 0,36                  | 45                                | 1,861              | 3,358              |
| 2 |                       | 35                                | 2,253              | 4,177              |
| 3 |                       | 25                                | 2,183              | 4,292              |
| 4 |                       | 15                                | 1,778              | 3,697              |

Еще большего увеличения жесткости консольно закрепленной спицы можно добиться, перераспределяя толщины оболочечных элементов и усиливая сечения, близкие к комелю. Это показано в следующем эксперименте, результаты которого представлены в табл. 6. Данные соответствуют модели с углом армирования волокон  $\varphi = 25^\circ$ . В ней выделены три зоны (рис. 7) с различной толщиной стенки. Из данных табл. 6 видно, что утолщение элементов первой зоны приводит к повышению изгибной жесткости. Толщина стенки в третьей зоне при этом пропорционально уменьшается, чтобы общая масса спицы оставалась неизменной.

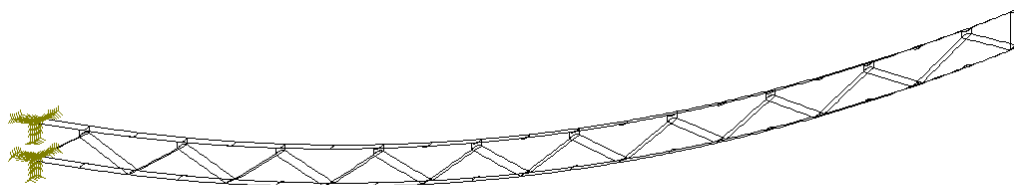


Рис. 6. Спица с десятью типовыми секторами

Fig. 6. Spoke with ten standard sectors

Таблица 6

**Величины первых частот колебаний спицы эллиптического сечения с зонами различной толщины стенки (угол армирования  $\varphi = 25^\circ$ )**

| № | Толщины элементов по зонам, мм |      |      | Первая частота, Гц | Вторая частота, Гц |
|---|--------------------------------|------|------|--------------------|--------------------|
|   | 1                              | 2    | 3    |                    |                    |
| 1 | 0,36                           | 0,36 | 0,36 | 2,183              | 4,292              |
| 2 | 0,48                           | 0,36 | 0,24 | 2,652              | 4,843              |
| 3 | 0,60                           | 0,36 | 0,12 | 2,964              | 5,142              |

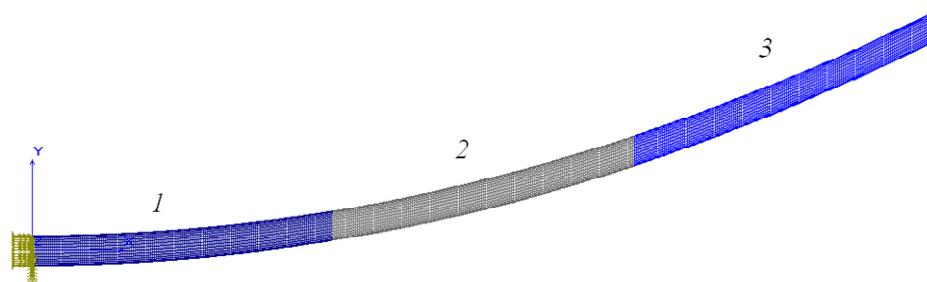


Рис. 7. Три зоны спицы с различной толщиной стенки

Fig. 7. Three spoke zones with different wall thicknesses

### Исследование сетчатой спицы эллиптического сечения

Рассмотрим сетчатую спицу эллиптического сечения (величины осей 200 и 90 мм), выполненную методом непрерывной намотки композитного волокна (рис. 8). Конструкция представляет собой три семейства ребер: спиральных и кольцевых (рис. 9). Первые два образуются намоткой композитных волокон по геодезическим линиям поверхности под углами  $\pm\varphi$  к продоль-

ной оси спицы. Третьи (кольцевые) располагаются в сечениях, отстоящих по оси на равные расстояния от точек пересечения спиральных ребер.

Основными проектными параметрами при построении сетчатой конструкции конкретной спицы являются:

- число спиральных ребер каждого семейства;
- угол намотки спиральных ребер  $\varphi$ ;
- высота и ширина ребер спиральной и кольцевой групп.

Отметим, что сечения в обеих группах спиральных ребер должны быть одинаковы, а сечения кольцевых ребер могут быть отличными.

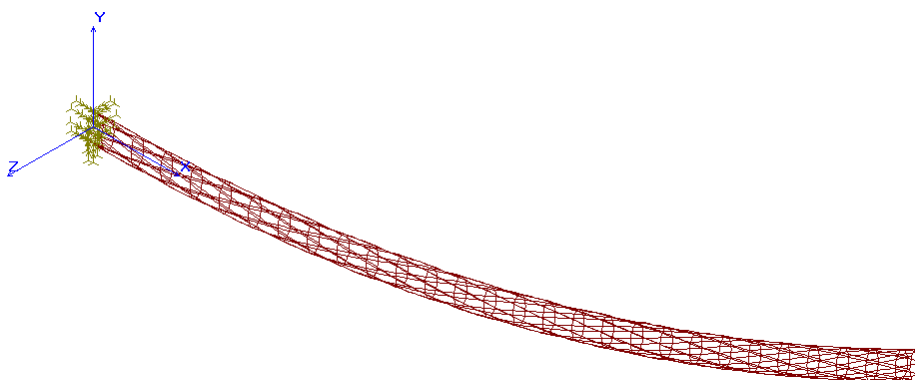


Рис. 8. Сетчатая спица с эллиптическим поперечным сечением

Fig. 8. Mesh spoke with elliptical cross section

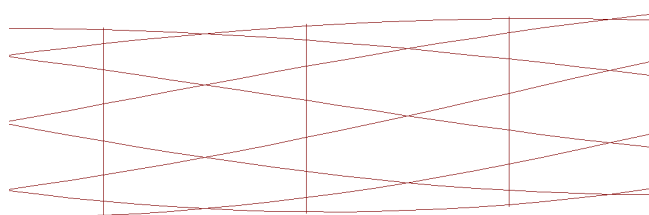


Рис. 9. Два семейства ребер анизогридной спицы

Fig. 9. Two families of anisogrid spoke ribs

Выполним сначала модальный расчет анизогридной спицы эллиптического сечения (рис. 8) высотой 200 мм и шириной 90 мм без учета веса полотна. В исходной модели зададим 8 пар спиральных ребер с углом их намотки  $\varphi = \pm 10^\circ$ . Исследуем зависимость изгибной жесткости спиц от значений угла ориентации спиральных ребер  $\varphi$ . Следует отметить, что при увеличении этого параметра, во-первых, увеличивается длина спиральных ребер и, во-вторых, – количество кольцевых ребер. Можно сказать, что сгущается сетка (рис. 10). Поэтому, чтобы сохранялась общая масса конструкции (при увеличении  $\varphi$ ), необходимо корректировать размеры поперечных сечений ребер (немного уменьшать).

Результаты численного эксперимента для ряда значений угла ориентации спиральных ребер  $\varphi$  представлены в табл. 7. При анализе этих данных можно сделать вывод о том, что угол намотки спиральных ребер имеет решающее влияние на изгибную жесткость анизогридной конструкции. Частоты собственных колебаний выше у моделей с малыми значениями угла  $\varphi$ , поскольку при них выше величина приведенного модуля упругости материала конструкции, однозначно влияющего на частоты собственных колебаний. Учитывая выявленную зависимость в дальнейшем исследовании, будем использовать модель с наименьшим из технологически допустимых значений угла намотки спиральных ребер, а именно  $\varphi = \pm 10^\circ$ .

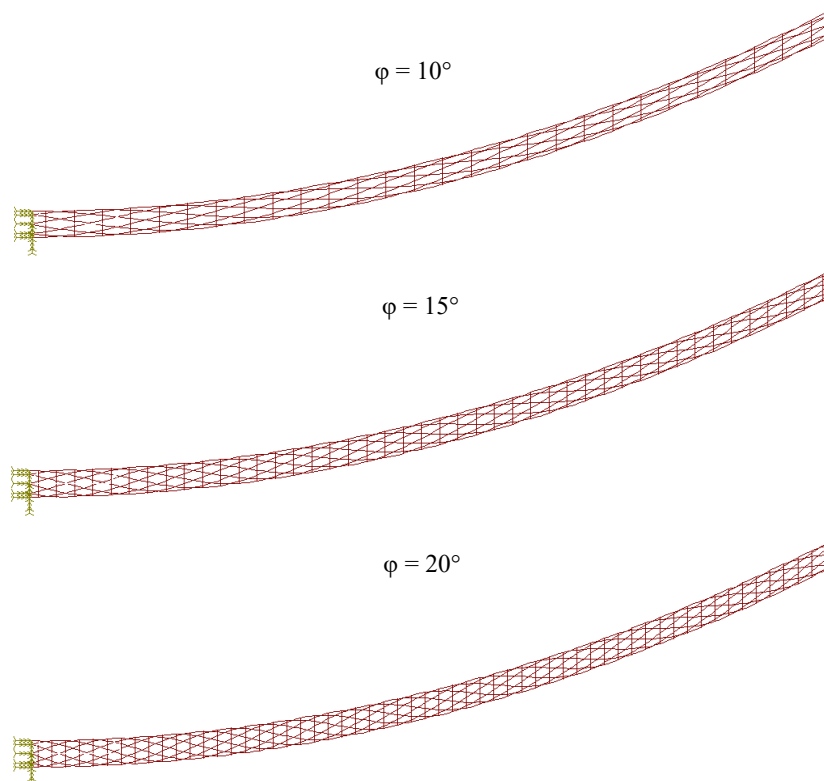


Рис. 10. Сетчатая спица с эллиптическим поперечным сечением с различными значениями угла намотки спиральных ребер

Fig. 10. Mesh spoke with elliptical cross-section with different winding angles of spiral ribs

Таблица 7

Величины первых частот колебаний сетчатой спицы эллиптического сечения

| № | Угол намотки спиральных ребер, $\varphi$ , град. | Сечение ребер, $h \times h$ , мм $\times$ мм | Масса спицы, кг | Первая частота, Гц | Вторая частота, Гц |
|---|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 10                                               | 3,3                                          | 1,856           | 4,507              | 10,437             |
| 2 | 15                                               | 3,2                                          | 1,880           | 4,403              | 9,674              |
| 3 | 20                                               | 3,1                                          | 1,881           | 4,12               | 8,961              |

В следующем эксперименте проанализируем влияние числа спиральных ребер в двух первых группах на изгибную жесткость. Фактически здесь будем рассматривать модели с различной густотой сетки (рис. 11–14).

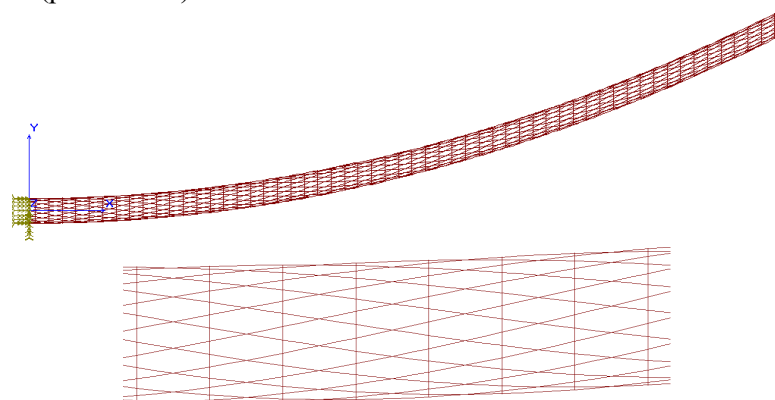


Рис. 11. Сетчатая спица с 16 спиральными ребрами одного семейства

Fig. 11. Mesh spoke with 16 spiral ribs of the same family



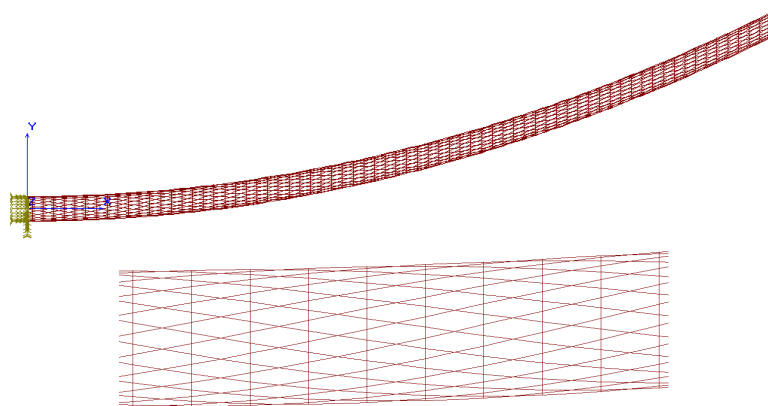


Рис. 12. Сетчатая спица с 20 спиральными ребрами одного семейства

Fig. 12. Mesh spoke with 20 spiral ribs of the same family

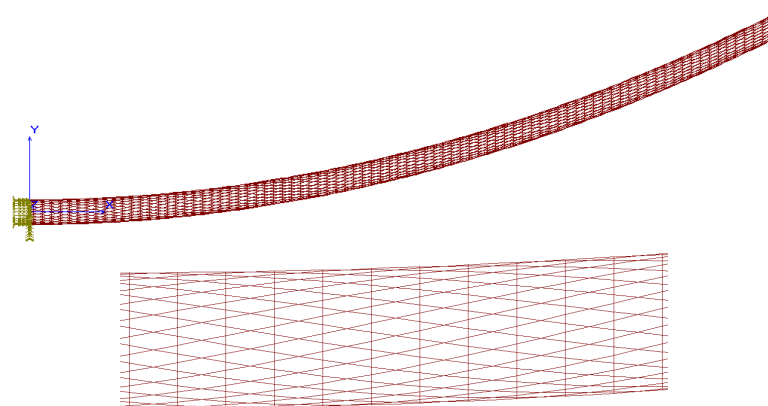


Рис. 13. Сетчатая спица с 24 спиральными ребрами одного семейства

Fig. 13. Mesh spoke with 24 spiral ribs of the same family

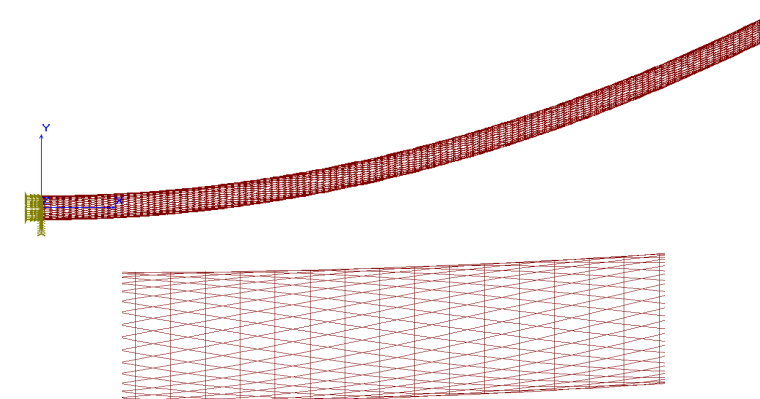


Рис. 14. Сетчатая спица с 32 спиральными ребрами одного семейства

Fig. 14. Mesh spoke with 32 spiral ribs of the same family

Результаты модальных расчетов для спиц с различным числом спиральных ребер представлены в табл. 8. Сечения ребер варьируются, чтобы общая масса спицы оставалась в заданных пределах (не более 2 кг). Эти данные свидетельствуют о том, что спицы равной массы с различной и равномерной густотой сетки имеют примерно одинаковую изгибную жесткость.

Таблица 8

**Величины первых частот колебаний сетчатой спицы эллиптического сечения с различным числом спиральных ребер**

| № | Количество спиральных ребер одного семейства | Сечение ребер, $h \times h$ , мм×мм | Масса спицы, кг | Первая частота, Гц | Вторая частота, Гц |
|---|----------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 16                                           | 2,3                                 | 1,80            | 5,003              | 12,487             |
| 2 | 20                                           | 2,0                                 | 1,702           | 5,021              | 12,606             |
| 3 | 24                                           | 2,0                                 | 2,04            | 5,057              | 12,735             |
| 4 | 32                                           | 1,5                                 | 1,53            | 4,994              | 12,547             |
| 5 | 32                                           | спиральных – 1,7<br>кольцевых – 1,5 | 1,914           | 5,024              | 12,588             |

### Добавление массы полотна

При добавлении массы сектора полотна (рис. 2) частоты собственных колебаний уменьшаются (табл. 9), однако для всех исследованных моделей с различной густотой сетки они примерно в 2,5 раза выше (по первой частоте), чем у базовой модели.

Таблица 9

**Величины первых частот колебаний сетчатой спицы эллиптического сечения с различным числом спиральных ребер с учетом массы полотна**

| № | Количество спиральных ребер одного семейства | Сечение ребер, $h \times h$ , мм×мм | Масса спицы, кг | Первая частота, Гц | Вторая частота, Гц |
|---|----------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 16                                           | 2,3                                 | 1,80            | 2,492              | 6,422              |
| 2 | 20                                           | 2,0                                 | 1,702           | 2,479              | 6,415              |
| 3 | 24                                           | 2,0                                 | 2,04            | 2,695              | 6,990              |
| 4 | 32                                           | 1,5                                 | 1,53            | 2,368              | 6,142              |
| 5 | 32                                           | спиральных – 1,7<br>кольцевых – 1,5 | 1,914           | 2,595              | 6,699              |
| 6 | 32                                           | 1,7                                 | 1,965           | 2,626              | 6,809              |

Заметим, что масса полотна учтена добавлением в КЭ модель элементов сосредоточенной массы MASS. На рис. 15 показаны номера в месте расположения этих элементов в сетчатой спице с 16 спиральными ребрами одного семейства.

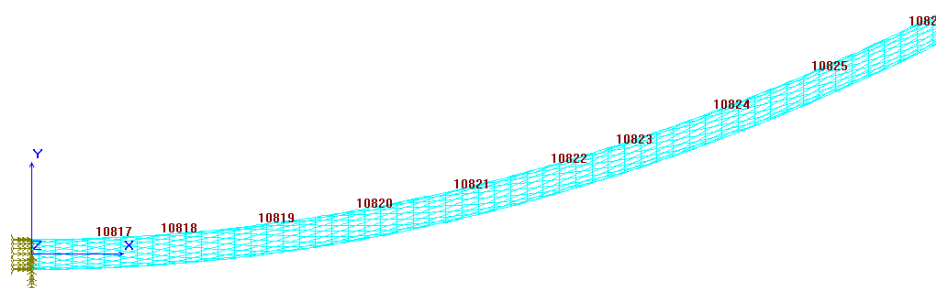


Рис. 15. Элементы сосредоточенной массы MASS в сетчатой спице с 16 спиральными ребрами одного семейства

Fig. 15. Mass elements MASS in a mesh spoke with 16 spiral ribs of the same family

### Устойчивость

Исследованные модели равной массы с различным числом спиральных ребер обеспечивают практически одинаковую жесткость (см. табл. 9). Однако они обнаружили разное поведение в экспериментах на устойчивость под действием собственного веса в исходном и перевернутом положениях. Результаты этих расчетов приведены в табл. 10. Они показывают, что по мере

сгущения сетки увеличиваются критические нагрузки. Это обусловлено тем обстоятельством, что укорачивается длина отрезков ребер в типовом сегменте, что и приводит к повышению коэффициентов запаса устойчивости, т. е. увеличивается несущая способность.

Зоны потери устойчивости во всех случаях локализованы у комеля (рис. 16): выгибаются отрезки отдельных ребер тех сегментов, которые ближе к закрепленному концу. Однако общая картина анизотридной конструкции с регулярной густой сеткой соответствует оболочечной форме потери устойчивости.

Отметим, что критическая нагрузка сетчатой спицы существенно выше, чем в исходной базовой модели (см. рис. 6).

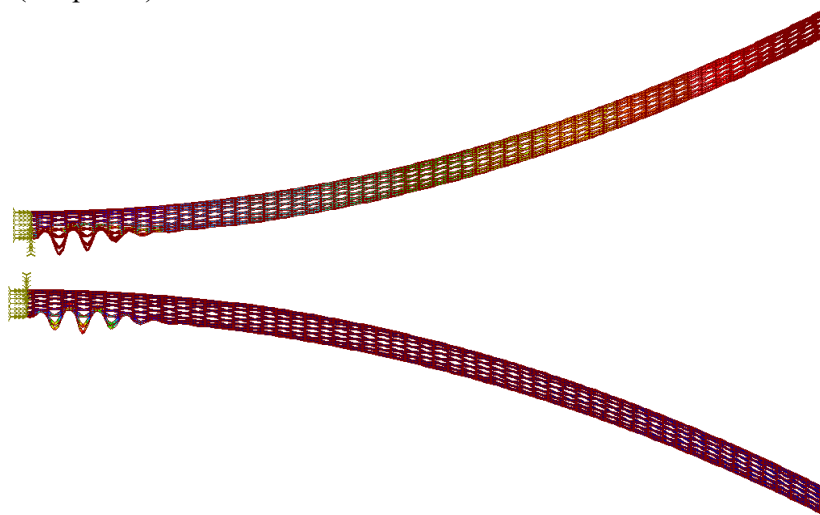


Рис. 16. Формы потери устойчивости сетчатой спицы с 16 спиральными ребрами одного семейства под действием собственного веса в исходном (вверху) и перевернутом положениях

Fig. 16. Buckling modes of a mesh spoke with 16 spiral ribs of the same family under its own weight in the original (top) and inverted positions

Таблица 10

**Коэффициенты запаса устойчивости сетчатой спицы эллиптического сечения с различным числом спиральных ребер**

| № | Количество спиральных ребер одного семейства | Сечение ребер, $h \times h$ , мм×мм | Масса спицы, кг | Коэффициент запаса устойчивости |                        |
|---|----------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------------|------------------------|
|   |                                              |                                     |                 | Исходное положение              | Перевернутое положение |
| 1 | 16                                           | 2,3                                 | 1,80            | 9,458                           | 9,702                  |
| 2 | 20                                           | 2,0                                 | 1,702           | 9,906                           | 9,921                  |
| 3 | 24                                           | 2,0                                 | 2,04            | 15,065                          | 15,308                 |
| 4 | 32                                           | 1,7                                 | 1,965           | 17,691                          | 16,61                  |

### Модель с зонами различных сечений элементов

Учитывая результаты предыдущих исследований спицы базовой модели и сплошной мотанной эллиптического сечения, можно предположить, что усиление сечений, прилегающих к закрепленному концу (комелю), будет повышать изгибную жесткость конструкции. Усиливать эти сечения можно двумя способами: сгущением сетки за счет увеличения числа спиральных ребер и за счет «утолщения» самих ребер.

Поскольку в рассматриваемых нами анизотридных моделях сетка балочных элементов достаточно густая и конструкция работает во многом как оболочка (это было продемонстрировано при анализе несущей способности), то указанные выше два способа усиления сечений равнозначны.

В следующем эксперименте выполним модальный расчет спицы с различными сечениями балочных элементов в трех зонах (рис. 17).

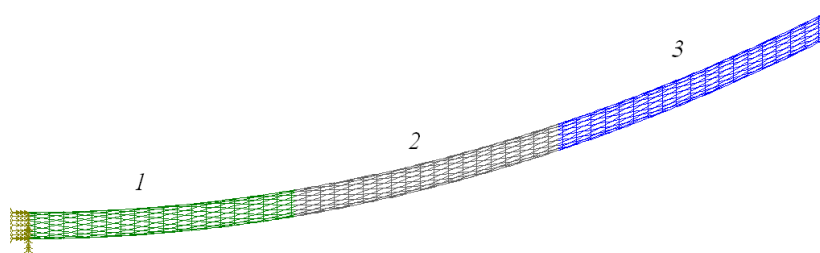


Рис. 17. Три отрезка спицы с различными размерами поперечного сечения балочных элементов

Fig. 17. Three spoke lengths with different cross-sectional dimensions of the beam elements

В качестве исходной возьмем сетчатую спицу с 16 спиральными ребрами в каждом из двух семейств с углом их намотки под углами  $\varphi = \pm 10^\circ$ .

Будем последовательно уменьшать размер квадратного сечения балочных элементов в третьей зоне (рис. 17), расположенной ближе к свободному концу и пропорционально увеличивать сечения ребер в первой зоне, прилегающей к комелю. Здесь для сохранения неизменной массы всей конструкции выбран линейный закон изменения площадей сечения в трех зонах. Результаты расчетов интересующих нас частот собственных колебаний сведены в табл. 11 – для «голой» спицы и табл. 12 – для спицы, воспринимающей инерционное воздействие массы полотна, которое, как и прежде, имитируется элементами сосредоточенной массы MASS (см. рис. 15).

Анализ полученных данных показывает, что за счет перераспределения масс можно повысить изгибную жесткость на 26 % (по первой частоте).

Для повышения эффективности этого способа необходимо провести дополнительное исследование, в котором должны быть учтены технологические особенности изготовления анизотропных конструкций.

Таблица 11

**Величины первых частот колебаний сетчатой спицы эллиптического сечения с различными размерами поперечных сечений ребер в отдельных зонах (без учета массы полотна)**

| № | Сечение ребер, $h \times h$ , мм×мм<br>по зонам |     |     | Масса спицы,<br>кг | Первая частота,<br>Гц | Вторая частота,<br>Гц |
|---|-------------------------------------------------|-----|-----|--------------------|-----------------------|-----------------------|
|   | 1                                               | 2   | 3   |                    |                       |                       |
| 1 | 2,3                                             | 2,3 | 2,3 | 1,80               | 5,003                 | 12,487                |
| 2 | 2,57                                            | 2,3 | 2,0 | 1,792              | 6,169                 | 15,311                |
| 3 | 2,89                                            | 2,3 | 1,5 | 1,778              | 8,429                 | 20,652                |

Таблица 12

**Величины первых частот колебаний сетчатой спицы эллиптического сечения с различными размерами поперечных сечений ребер в отдельных зонах (с учетом массы полотна)**

| № | Сечение ребер, $h \times h$ , мм×мм<br>по зонам |     |     | Масса спицы,<br>кг | Первая частота,<br>Гц | Вторая частота,<br>Гц |
|---|-------------------------------------------------|-----|-----|--------------------|-----------------------|-----------------------|
|   | 1                                               | 2   | 3   |                    |                       |                       |
| 1 | 2,3                                             | 2,3 | 2,3 | 1,80               | 2,492                 | 6,422                 |
| 2 | 2,57                                            | 2,3 | 2,0 | 1,792              | 2,780                 | 7,176                 |
| 3 | 2,89                                            | 2,3 | 1,5 | 1,778              | 3,144                 | 7,867                 |

### Сплошная композитная спица кольцевого сечения с сужением у комеля

Одним из существенных недостатков рассмотренных выше моделей спиц является низкая частота горизонтальных собственных колебаний, которая примерно в 2,5 раза ниже, чем частота вертикальных колебаний. Это обусловлено формой поперечного сечения спицы, вытянутой в вертикальном направлении. Очевидно, что спица круглого сечения свободна от этого недос-

татка. Однако ширина сечения спицы у комеля ограничена конструктивными особенностями и не может превышать 90 мм. Смоделируем спицу сплошного сечения, учитывающую это ограничение (рис. 18). Большая часть спицы имеет постоянное круглое кольцевое сечение, а в зоне (длиной 800 мм), прилегающей к комелю, сечение переменного вида: переходящее от круглой формы к эллиптической (по направлению к закрепленному концу).

Модальный расчет для этой модели (с учетом массы полотна) дал следующие значения для двух первых частот (рис. 19 и 20) собственных колебаний 3,083 и 3,346 Гц соответственно. Это значительно лучше, чем у базовой модели (см. рис. 6).

Представленное выше решение выполнено для модели с одинаковой по всей длине толщиной стенки 0,36 мм. Общая масса «голой» спицы 2,04 кг. Угол армирования продольных волокон  $\varphi = \pm 45^\circ$ .

Если выполнить перераспределение толщин по зонам (как на рис. 17), то можно на треть (по первой частоте) повысить изгибную жесткость. Это хорошо видно по данным табл. 13.

Данную модель можно считать оптимальной по жесткости, так как частоты колебаний горизонтального (рис. 19) и вертикального (рис. 20) направлений почти совпадают.

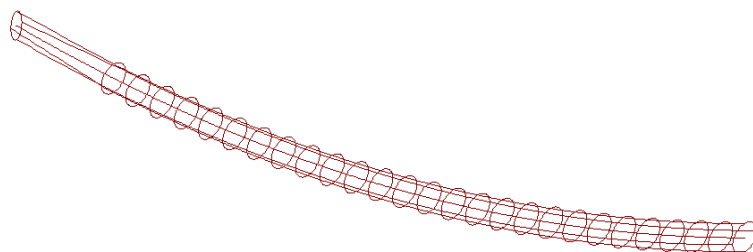


Рис. 18. Сечения спицы с сужением у комеля

Fig. 18. Cross-sections of a spoke with a narrowing at the butt

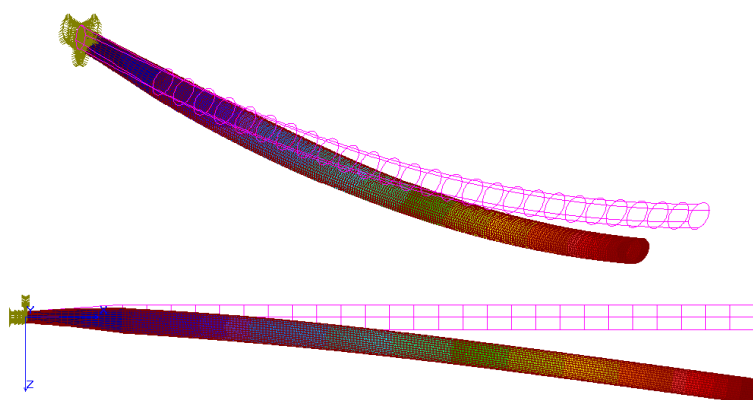


Рис. 19. Первая форма колебаний спицы с сужением (внизу – вид сверху)

Fig. 19. The first vibration mode of a spoke with a narrowing (below – top view)

Таблица 13

**Величины первых частот колебаний сплошной спицы кольцевого сечения с сужением у комеля и зонами различной толщины стенки**

| № | Толщина стенки, $h$ , мм по зонам |      |      | Масса спицы, кг | Первая частота, Гц | Вторая частота, Гц |
|---|-----------------------------------|------|------|-----------------|--------------------|--------------------|
|   | 1                                 | 2    | 3    |                 |                    |                    |
| 1 | 0,36                              | 0,36 | 0,36 | 2,04            | 3,083              | 3,346              |
| 2 | 0,48                              | 0,36 | 0,24 | 2,02            | 3,654              | 3,959              |
| 3 | 0,60                              | 0,36 | 0,12 | 2,00            | 4,160              | 4,166              |

Таблица 14

**Величины первых частот колебаний сплошной спицы кольцевого сечения с сужением у комеля и зонами различной толщины стенки в моделях с различными углами намотки волокон**

| № | Толщины по зонам, мм | Угол армирования, $\varphi$ , град | Частоты собственных колебаний, Гц |             |
|---|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------|
|   |                      |                                    | Первая мода                       | Вторая мода |
| 1 | 0,60-0,36-0,12       | 45                                 | 4,160                             | 4,166       |
| 2 |                      | 35                                 | 4,701                             | 4,296       |
| 3 |                      | 25                                 | 4,270                             | 3,626       |
| 4 |                      | 15                                 | 3,379                             | 2,782       |

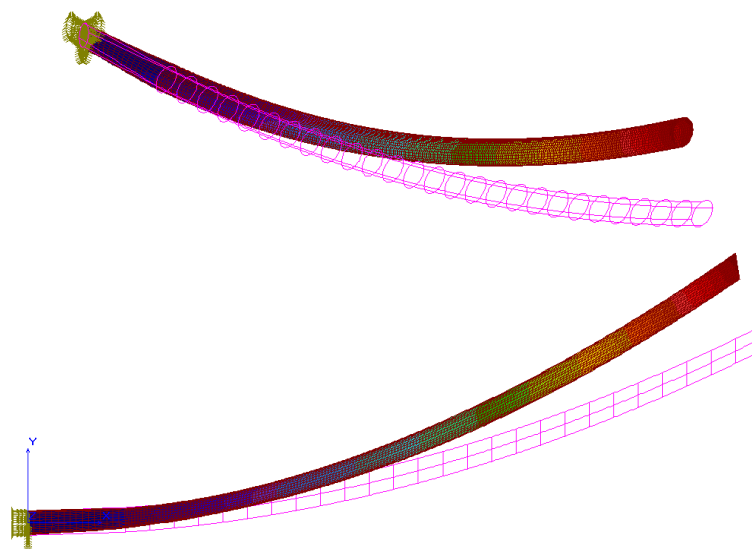


Рис. 20. Вторая форма колебаний спицы с сужением (внизу – вид сбоку)

Fig. 20. The second vibration mode of the spoke with a narrowing (below – side view)

При необходимости с целью повышения значений исследуемых частот собственных колебаний можно оптимизировать ориентацию продольных волокон. Так, например, для модели № 3 (см. табл. 13) некоторое уменьшение угла армирования продольных волокон  $\varphi$  в пределах от 45 до 35 градусов приводит к заметному увеличению жесткости горизонтального изгиба и к слабому увеличению жесткости вертикального направления (см. табл. 14).

#### **Сетчатая композитная спица кольцевого сечения с сужением у комеля**

Рассмотрим модель сетчатой композитной спицы кольцевого сечения с сужением у комеля (рис. 21).

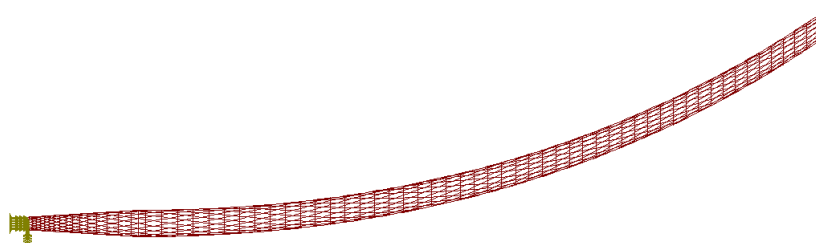


Рис. 21. Сетчатая композитная спица кольцевого сечения с сужением у комеля

Fig. 21. Mesh composite spoke of circular cross-section with a narrowing at the butt

7. Иванов А. В., Зоммер С. А. Анализ процесса раскрытия зонтичного рефлектора на стенде с активной системой обезвешивания // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5, № 4. С. 208–216. DOI: 10.26732/j.st.2021.4.04.
8. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн. Ч. 1 // *Вестник СибГАУ*. 2007. № 2. С. 51–57.
9. Тайгин В. Б., Лопатин А. В. Метод обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2019. Т. 3, № 4 (30). С. 200–208.
10. Satish K. Sh., Sudhakar R., Lotfollah Sh. Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems // *Theory and Design of Reflectors*. 2013. Vol. 1. P. 350.
11. Тайгин В. Б., Лопатин А. В. Обзор конструкций зеркальных антенн космических аппаратов с твердотельными прецизионными размеростабильными рефлекторами // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5, № 1. С. 14–26. DOI: 10.26732/j.st.2021.1.02.
12. Тайгин В. Б., Лопатин А. В. Метод обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2019. Т. 3, № 4. С. 200–208. DOI: 10.26732/2618-7957-2019-4-200-208.
13. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Выбор оптимальных параметров спицы зонтичной антенны для обеспечения максимальной изгибной жесткости // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2018. Т. 19, № 3. С. 504–509. DOI: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-504-509.
14. Imbriale W. Spaceborne Antennas for Planetary Exploration. NJ. John Wiley and Sons. 2006, 592 p.
15. Akira M. In-orbit deployment performance of large satellite antennas // *J. Spacecraft and Rockets*. 1996. Vol. 33, No. 2. P. 222–227.

## References

1. Vasiliev V. V. Mechanics of Composite Structures. Taylor & Francis, 1993.
2. Kassapoglou C. Design and Analysis of Composite Structures: With Applications to Aerospace Structures. 2013, John Wiley & Sons Ltd. 402 p. DOI: 10.1002/9781118536933.
3. Decolon C. Analysis of Composite Structures. Butterworth-Heinemann. 2004. 336 p.
4. Terletsky G. S., Zykov A. O., Taigin V. B. [Analysis of the designs of membrane transformable antennas of cable devices]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2022, Vol. 6, No. 3, P. 149–162 (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2022.3.01.
5. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatzionnogo obespecheniya* [Fundamentals of designing spacecraft for information support]. Krasnoyarsk, 2011, 488 p.
6. Kabanov S. A., Kabanov D. S. [Optimal opening of the spokes of a large-sized transformable reflector according to the hierarchy of criteria]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2021, Vol. 5, No. 4, P. 191–197 (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2021.4.02.
7. Ivanov A. V., Sommer S. A. [Analysis of the process of opening an umbrella reflector on a stand with an active weight-neutralization system]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2021, Vol. 5, No. 4, P. 208–216 (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2021.4.04.
8. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. [Review of the designs of modern transformable space antennas (part 1)]. *Vestnik SibSAU*. 2007, No. 2, P. 51–57 (In Russ.).
9. Taigin V. B., Lopatin A. V. [Method for ensuring high accuracy of the shape of reflectors of mirror antennas of spacecraft]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2019, Vol. 3, No. 4 (30), P. 200–208 (In Russ.).
10. Satish K. Sh., Sudhakar R., Lotfollah Sh. Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems. *Theory and Design of Reflectors*. 2013, Vol. 1, P. 350.
11. Taigin V. B., Lopatin A. V. [Review of the designs of mirror antennas for spacecraft with solid-state precision size-stable reflectors]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2021, Vol. 5, No. 1, P. 14–26 (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2021.1.02.

На отрезке длиной 0,8 м, непосредственно прилегающем к закрепленному концу, сетчатая конструкция имеет линейно переменное сечение. На остальной части спицы сечение постоянное – кольцевое, диаметром 200 мм. Число спиральных ребер на обоих участках спицы равно 16. На отрезке постоянного сечения угол ориентации спиральных ребер также постоянный  $\varphi = \pm 10^\circ$ . В зоне переменного сечения (на отрезке у комеля) величина угла армирования изменяется вдоль оси спицы согласно закону Клеро. Она равна  $\varphi = \pm 10^\circ$  у сечения стыковки зон с переменным и постоянным сечениями и увеличивается в направлении к закрепленному концу (рис. 22).

«Голая» спица имеет массу 1,961 кг (сечения всех ребер одинаковы 2,3 x 2,3 мм). В модальном расчете получены частоты собственных колебаний: 7,859 и 8,523 Гц для первой (рис. 23) и второй (рис. 24) моды соответственно.

С учетом массы сектора полотна (см. рис. 2) получены следующие значения: 4,171 и 4,643 Гц для первой (рис. 23) и второй (рис. 24) моды соответственно. Это даже лучше, чем у сплошной мотанной спицы (с сужением у комеля) с оптимизированными в зонах толщинами (см. табл. 13 и 14).

Если увеличить мощность ребер конической части (прилегающей к комелю), то можно еще более увеличить жесткость конструкции. Так, например, если задать здесь сечение ребер 3,5x3,5 мм, а в остальной (цилиндрической) части спицы – 2,0x2,0 мм (при этом общая масса останется неизменной), то частоты первой и второй мод собственных колебаний увеличатся до 4,564 и 5,181 Гц соответственно.

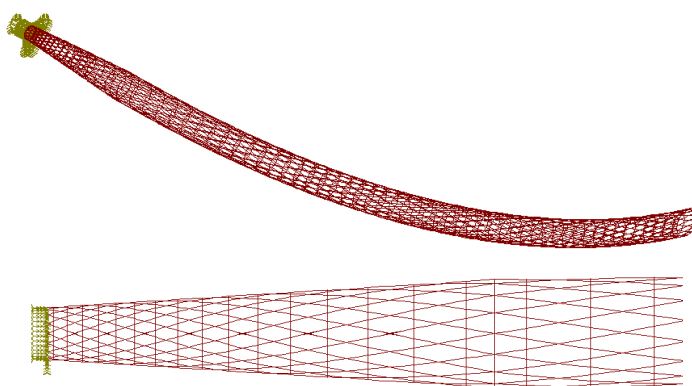


Рис. 22. Место стыковки зон с переменным и постоянным сечениями

Fig. 22. The junction of zones with variable and constant sections

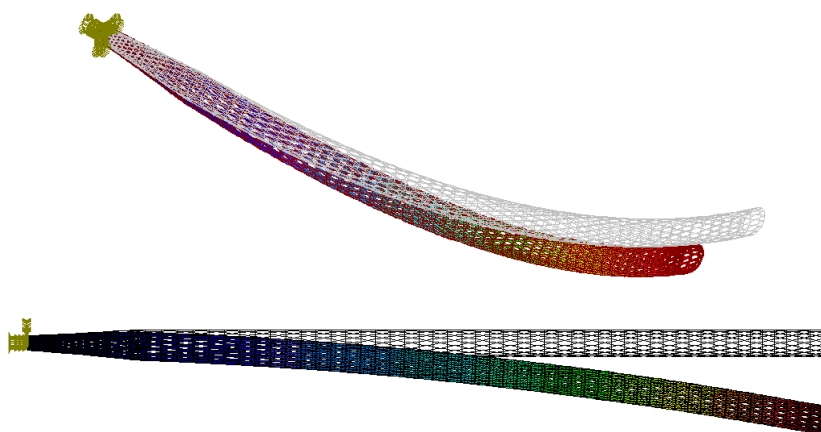


Рис. 23. Первая форма колебаний сетчатой спицы с сужением (внизу – вид сверху)

Fig. 23. The first mode of vibration of a mesh spoke with a narrowing (below – top view)



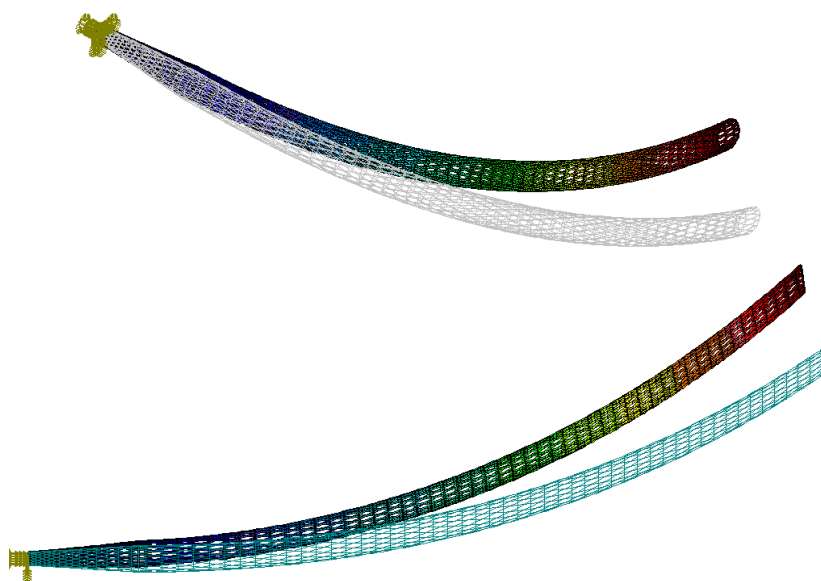


Рис. 24. Вторая форма колебаний сетчатой спицы с сужением (внизу – вид сбоку).

Fig. 24. The second mode of vibration of a mesh spoke with a narrowing (below – side view)

### Заключение

Точность профиля отражающей поверхности рефлектора главным образом достигается обеспечением стабильного положения радиальных спиц в развернутом состоянии. Эта стабильность зависит от жесткости консольно закрепленных спиц. На основе численного эксперимента в работе показаны возможности повышения жесткости спиц с сохранением регламентируемой массы. Этого можно добиться, во-первых, изменяя кольцевое поперечное сечение сплошной композитной спицы, изготавливаемой способом непрерывной намотки волокон, в частности, задавая ей эллиптическую форму с вертикальной ориентацией большой полуоси, во-вторых, оптимизируя углы армирования волокон в слоистой структуре композиционного материала спицы и, в-третьих, рационально перераспределяя толщины элементов вдоль образующей поверхности таким образом, чтобы усилить сечения, прилегающие к закрепленному концу спицы. Повысить массовую эффективность спицы также можно, используя сетчатую структуру ее стенок. Возможна оптимизация анизотропной модели при рациональном выборе углов ориентации спиральных ребер. Указанные способы повышения жесткости и устойчивости спицы подтверждены в расчетах с учетом массы сетеполотна антенны и верифицированы в анализе несущей способности спицы в исходном и перевернутом положениях.

### Библиографические ссылки

1. Vasiliev V. V. Mechanics of Composite Structures. Taylor & Francis, 1993.
2. Kassapoglou C. Design and Analysis of Composite Structures: With Applications to Aerospace Structures. 2013, John Wiley & Sons Ltd. 402 p. DOI: 10.1002/9781118536933.
3. Decolon C. Analysis of Composite Structures. Butterworth-Heinemann. 2004. 336 p.
4. Терлецкий Г. С., Зыков А. О., Тайгин В. Б. Анализ конструкций мембранных трансформируемых антенн космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6, № 3. С. 149–162. DOI: 10.26732/j.st.2022.3.01.
5. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. Красноярск, 2011. 488 с.
6. Кабанов С. А., Кабанов Д. С. Оптимальное раскрытие спиц крупногабаритного трансформируемого рефлектора по иерархии критериев // Космические аппараты и технологии. 2021. Т. 5, № 4. С. 191–197. DOI: 10.26732/j.st.2021.4.02.

12. Taigin V. B., Lopatin A. V. [Method for ensuring high accuracy of the shape of reflectors of mirror antennas of spacecraft]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2019, Vol. 3, No. 4, P. 200–208 (In Russ.). DOI: 10.26732/2618-7957-2019-4-200-208.
13. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. [Selection of optimal parameters of the umbrella antenna spoke to ensure maximum bending rigidity]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2018, Vol. 19, No. 3, P. 504–509 (In Russ.). DOI: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-504-509.
14. Imbriale W. Spaceborne Antennas for Planetary Exploration. NJ. John Wiley and Sons. 2006, 592 p.
15. Akira M. In-orbit deployment performance of large satellite antennas. *J. Spacecraft and Rockets*. 1996, Vol. 33, No. 2, P. 222–227.

© Нестеров В. А., Габидулин С. В., 2024

---

**Нестеров Владимир Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [nesterov@mail.sibsau.ru](mailto:nesterov@mail.sibsau.ru). <https://orcid.org/0009-0003-6384-3849>

**Габидулин Сергей Владимирович** – доцент кафедры инженерной графики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [gabidulin@sibsau.ru](mailto:gabidulin@sibsau.ru). <https://orcid.org/0009-0003-1072-9436>

**Nesterov Vladimir Anatolievich** – Cand. Sc., Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [nesterov@mail.sibsau.ru](mailto:nesterov@mail.sibsau.ru). <https://orcid.org/0009-0003-6384-3849>

**Gabidulin Sergey Vladimirovich** – Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [gabidulin@sibsau.ru](mailto:gabidulin@sibsau.ru). <https://orcid.org/0009-0003-1072-9436>

---

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; принята к публикации 25.11.2024; опубликована 26.12.2024  
The article was submitted 14.11.2024; accepted for publication 25.11.2024; published 26.12.2024

УДК 621.391

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-482-492

**Для цитирования:** Повышение точности позиционирования системы ГЛОНАСС / А. Л. Тимофеев, А. Х. Султанов, И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 482–492. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-482-492.

**For citation:** Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Meshkov I. K., Gizatulin A. R. [Increasing the positioning accuracy of the GLONASS system]. Siberian Aerospace Journal. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 482–492. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-482-492.

## Повышение точности позиционирования системы ГЛОНАСС

А. Л. Тимофеев, А. Х. Султанов, И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин

Уфимский университет науки и технологий  
Российская Федерация, 450076, г. Уфа, ул. З. Валиди, 32  
E-mail: a\_l\_t@inbox.ru

*Точность определения координат в системах глобального позиционирования определяется количеством спутников, одновременно видимых навигационным оборудованием потребителя. На большей части поверхности земли над горизонтом находятся одновременно до 11 спутников ГЛОНАСС. Однако отношение сигнал/шум в канале связи, необходимое для безошибочного приема информации, часто обеспечивается только для 2–4 спутников. Для повышения точности позиционирования предложено использовать метод голографического помехоустойчивого кодирования, основанный на голографическом представлении цифрового сигнала. Процесс кодирования сообщения представляет собой математическое моделирование голограммы, создаваемой в виртуальном пространстве волной от источника входного сигнала. Показано, что голографическое представление сигнала обладает существенно большей помехоустойчивостью и позволяет восстановить исходную цифровую комбинацию при потере большей части кодового сообщения и при искажении кодированного сигнала шумом, в несколько раз превосходящим уровень сигнала. Проведенные исследования показали, что введение голографического кодирования в канале спутниковой связи системы ГЛОНАСС даст возможность навигационной аппаратуре потребителей получать информацию с большего количества спутников, что существенно повысит точность позиционирования. В часто встречающейся ситуации, когда требуемое отношение сигнал/шум выдерживается только для 4 спутников ГЛОНАСС, погрешность позиционирования превышает 10 м. При использовании голографического кодирования в такой же ситуации будет безошибочно декодироваться информация от 9 спутников и погрешность позиционирования составит около 2 м.*

*Ключевые слова:* голографическое кодирование, исправление ошибок в канале связи, погрешность позиционирования.

## Increasing the positioning accuracy of the GLONASS system

A. L. Timofeev, A. Kh. Sultanov, I. K. Meshkov, A. R. Gizatulin

Ufa State Aviation Technical University,  
32, Z. Validi St., Ufa, 450076, Russian Federation  
E-mail: a\_l\_t@inbox.ru

*The accuracy of determining coordinates in global positioning systems is determined by the number of satellites simultaneously visible to the consumer's navigation equipment. Over most of the earth's surface, there are up to 11 GLONASS satellites above the horizon at the same time, but the signal-to-noise ratio in*

*the communication channel required for error-free information reception is often ensured only for 2-4 satellites. To improve the positioning accuracy, it is proposed to use the holographic noise-immune coding method based on the holographic representation of the digital signal. The message coding process is a mathematical modeling of a hologram created in virtual space by a wave from the input signal source. It is shown that the holographic representation of the signal has significantly greater noise immunity and allows restoring the original digital combination when most of the code message is lost and when the coded signal is distorted by noise several times exceeding the signal level. The studies have shown that the introduction of holographic coding in the GLONASS satellite communication channel will enable consumer navigation equipment to receive information from a larger number of satellites, which will significantly improve the positioning accuracy. In a common situation where the required signal-to-noise ratio is maintained for only 4 GLONASS satellites, the positioning error exceeds 10 meters. Using holographic coding in the same situation, information from 9 satellites will be decoded without error, and the positioning error will be about 2 meters.*

*Keywords: holographic coding, error correction in the communication channel, positioning error.*

### **Введение**

Одной из основных характеристик глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС является точность оценки координат и высоты, полученных в навигационной аппаратуре потребителей (НАП) только по спутниковым сигналам без привлечения дополнительной информации [1]. Особое значение точность позиционирования имеет для навигационных комплексов летательных аппаратов, в том числе беспилотных, в условиях непреднамеренных и умышленных помех [2; 3]. Однако недостаточная во многих случаях точность позиционирования требует разработки других способов решения этой задачи. В работе [4] предложено использовать для решения фундаментальных геодинимических и геодезических задач систему высокоточного определения эфемерид и временных поправок, осуществляющую сбор, хранение и обработку измерительной и навигационной информации по спутниковым навигационным системам ГЛОНАСС. В [5] предложены расчетные способы снижения ошибок, обусловленных прохождением сигнала в ионосфере и тропосфере, в [6] показано, что применение методов пространственной селекции с помощью антенной решетки позволяет существенно повысить точность навигационных определений за счет уменьшения влияния многолучевого приема. В работе [7] описана идея цифровой регистрации навигационных сигналов и предложен метод высокоскоростной постобработки для повышения точности оценок. Подход к повышению помехоустойчивости навигационной аппаратуры за счет использования схемы глубокого комплексирования навигационной аппаратуры предложен в работах [8; 9]. Способ повышения помехоустойчивости систем позиционирования путем передачи дополнительной метки времени рассмотрен в [10]. Наиболее сложным и затратным является предложенное в [11] создание новой навигационно-информационной спутниковой системы, устраняющей проблемы в развитии системы ГЛОНАСС. Большое влияние на точность позиционирования оказывают характеристики НАП. Стандартные образцы НАП не обеспечивают необходимый уровень помехоустойчивости при существующем уровне мощности принимаемых сигналов ГЛОНАСС порядка минус 166–156 дБВт [12; 13]. В системе ГЛОНАСС для повышения помехоустойчивости используется код Хэмминга, исправляющий однократные ошибки. Передаваемые блоки цифровой информации представляет собой 85-разрядный код, в котором старшие 77 разрядов содержат информационные символы, а младшие 8 разрядов – проверочные [12].

### **Постановка задачи**

Точность измерения координат определяется количеством спутников, одновременно видимых навигационным оборудованием. Ошибки ГЛОНАСС составляют 3–6 м при использовании 7–8 спутников. На большей части поверхности земли над горизонтом находятся одновременно до 11 спутников ГЛОНАСС, однако отношение сигнал/шум в канале связи, необходимое для

безошибочного приема информации, часто обеспечивается только для 2–4 спутников. На рис. 1 показан пример видимости спутников разных систем навигации в условиях городской застройки.

На рис. 2 показаны уровни сигналов для видимых спутников.

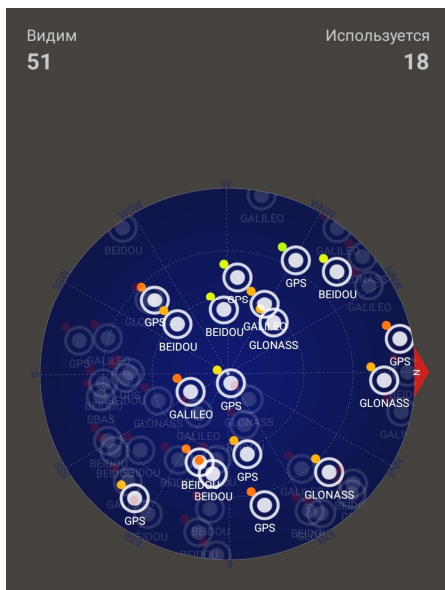


Рис. 1. Видимость спутников GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO

Fig. 1. Visibility of GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO satellites

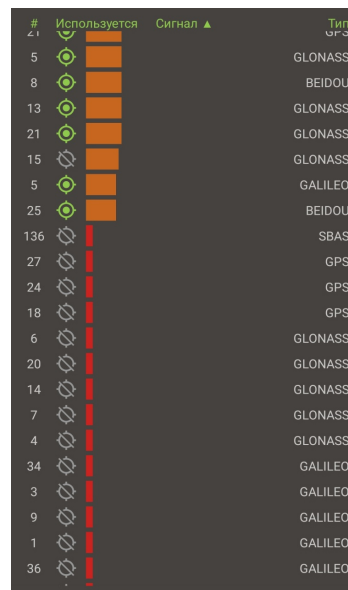


Рис. 2. Видимые и используемые спутники

Fig. 2. Visible and used satellites

Требуемое отношение сигнал/шум выдерживается для 4 спутников ГЛОНАСС, 5 спутников ГЛОНАСС находятся в зоне видимости, но не используются из-за низкого отношения сигнал/шум. В этих условиях погрешность позиционирования превышает 10 м. Уменьшить погрешность позиционирования можно не только увеличением числа спутников в спутниковой группировке, но и применением кодирования, обеспечивающего исправление большего числа ошибок.

К настоящему времени разработано большое количество корректирующих кодов различной эффективности. Однако их эффективность оказывается недостаточной для восстановления исходного сообщения при передаче информации по спутниковому каналу связи в условиях низкого отношения сигнал/шум, когда могут быть утрачены большие фрагменты информации. Одним из способов повышения устойчивости канала связи является использование формы представления сигнала, обеспечивающей восстановление сообщения по его фрагменту. Такой особенностью обладает голографический способ корректирующего кодирования [14; 15]. Голографический код может быть использован для решения самых разных задач, например, для повышения надежности бортовых систем памяти [16] или повышения помехозащищенности радиолокационного канала [17]. С таким же успехом голографическое кодирование может быть применено для повышения помехоустойчивости спутникового канала связи. Процесс кодирования передаваемой информации представляет собой математическое моделирование цифровой голограммы, создаваемой в виртуальном пространстве волной от кодируемого объекта [18; 19]. Голографическое кодирование произвольной цифровой информации отличается от оптической голографии следующими факторами:

- объект является одномерным;
- объект не привязан к пространственным измерениям, единица измерения размера объекта и голограммы – длина волны излучения;
- волна распространяется без затухания и когерентна на любой длине.

### Алгоритм голографического кодирования/декодирования

Входной блок данных исходного цифрового сообщения, представляющий собой  $n$ -разрядный двоичный код, преобразуется во вторичный блок – единичный позиционный код с числом позиций  $N = 2^n$ . Этим преобразованием в сообщение закладывается избыточность с коэффициентом  $q = 2^n/n$ . Вторичный блок имеет  $(N-1)$  нулей и одну единицу в позиции, заданной первичным блоком. Таким образом, блок исходного цифрового сообщения используется как адрес позиции единицы в последовательности нулей единичного позиционного кода вторичного блока.

Формирование кодовой комбинации проводится путем геометрического построения в плоскости.

Из первичного  $n$ -разрядного блока данных  $X$  формируется вторичный блок  $A$  – пространственный одномерный объект (далее – объект), состоящий из точек  $A(i)$ ,  $i = 1 \dots N$ , значение одной из которых равно 1, остальных – нули:  $A(x) = A(i) = 1$  при  $i = X$ ,  $A(i) = 0$  при  $i \neq X$ .

Расстояние между точками равно  $d$ . Ячейка  $A(x)$  является источником сферической волны, распространяющейся в плоскости анализа и характеризуемой длиной волны  $\lambda = d$ .

Рассмотрим значения сферического волнового фронта в плоскости нахождения объекта на линии, расположенной параллельной объекту на расстоянии  $L$ , в  $N$  точках с шагом  $d$ . Волна от источника распространяется без затухания и попадает на все элементы одномерного массива  $H(j)$ ,  $j = 1 \dots N$  (рис. 3). Эта совокупность точек образует срез зонной пластинки Френеля (зонную линейку Френеля), которая представляет собой простейшую голограмму – голограмму точки. Таким образом, одномерному объекту  $A(i)$  ставится в соответствие одномерная голограмма  $H(j)$ . Значения полученной голограммы округляются до одного бита, в результате чего формируется  $N$ -битный одномерный массив  $H_O(j)$ , представляющий из себя кодовую комбинацию  $n$ -разрядного входного блока данных  $X$ .

Значения волнового фронта в рассматриваемых точках  $H(j)$ ,  $j = 1 \dots N$  определяются фазой приходящей волны. Фаза волны  $\varphi$  является функцией пространственных координат. Значение волны от элемента  $A(i)$  в точке нахождения элемента голограммы  $H(j)$  равно

$$H(j) = A(i) \sin \varphi(i, j), \quad (1)$$

где  $\varphi(i, j)$  – фаза излучения элемента  $A(i)$  в точке  $H(j)$ .

Расстояние  $l(i, j)$  между точками  $A(i)$  и  $H(j)$  равно

$$l(i, j) = \sqrt{L^2 + d^2(i - j)^2},$$

тогда  $\varphi(i, j)$  – это дробная часть отношения  $l(i, j)$  к длине волны:

$$\varphi(i, j) = \{l(i, j) / \lambda\}.$$

Таким образом, кодовая комбинация  $H_O(j)$  – это голограмма точки, она же одномерная зонная линейка, несущая информацию из входного блока данных в виде  $N$ -разрядного кода координаты центра зон Френеля.

Кодовая комбинация передается по каналу связи и на приемной стороне производится декодирование – восстановление голограммы, поиск максимума и выдача его координаты в виде  $n$ -разрядного выходного кода.

Принятая по каналу связи искаженная голограмма  $H_R(j)$  рассматривается как одномерный массив точек, число которых может быть меньше  $N$  вследствие потери части информации, а значения принятых элементов искажены шумом. Каждая из точек голограммы  $H_R(j)$  является источником сферической волны с той же длиной волны  $\lambda$ , как и при кодировании. Восстанавливаемый объект  $A_R(i)$  представляет собой одномерный массив точек, расположенных с шагом  $d$  на прямой, параллельной голограмме  $H_R(j)$  и расположенной на расстоянии  $L$  от нее.

Интенсивность волны от точки голограммы  $H_R(j)$  в точке восстанавливаемого объекта  $A_R(i)$  вычисляется так же, как и при кодировании (1). В каждую точку объекта  $A_R(i)$  приходят волны

от каждой точки голограммы  $H_R(j)$  (рис. 3), и в результате интерференции этих волн формируются значения  $N$ -разрядного представления восстановленного объекта  $A_R(i)$ :

$$A_R(i) = \sum_{j=1}^N H_R(j), i = 1 \dots N.$$

Таким образом, восстановленный объект  $A_R(i)$  является голограммой второго порядка (голограммой голограммы) исходного объекта.

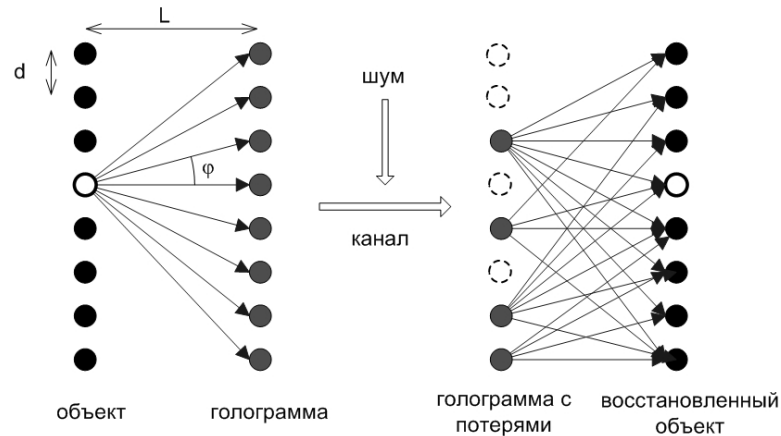


Рис. 3. Пространственная схема кодирования

Fig. 3. Spatial coding scheme

Для получения выходного блока данных в форме  $n$ -разрядного кода необходимо определить номер позиции  $Y$ , в которой находится максимум массива  $A_R(i)$ . Этот номер и есть значение выходного блока данных.

Последовательность операций алгоритма кодирования / декодирования:

1. Преобразование первичного блока данных  $X$  во вторичный блок  $A$ .
2. Расчет значений волнового фронта в точках голограммы  $H$ .
3. Передача голограммы.
4. Расчет восстановленного объекта  $A_R$  по принятой голограмме  $H_R$ .
5. Поиск максимума в массиве  $A_R$ .
6. Определение значения максимума и формирование выходного блока  $Y$ .

### Результаты моделирования

Исследование помехоустойчивости рассмотренного голографического кода проведено путем моделирования в среде Matlab процессов кодирования-декодирования при передаче кодовых сообщений по каналу с шумом. В качестве источника шума использован генератор псевдослучайного шума, реализованный функцией Random.

На рис. 4 приведен результат восстановления сигнала, несущего значение  $Y = 100$ . В восстановленном сигнале присутствует небольшой шум кодирования.

Уровень шума кодирования, который определяет потенциальную помехоустойчивость кода, зависит от длины кодовой комбинации. Форма восстановленного сигнала, несущего значение  $Y = 400$ , при  $N = 1024$  (коэффициент избыточности  $q = 128$ ) приведена на рис. 5.

Рассмотрим устойчивость кода к ошибкам, вызванным шумом в канале связи. Воздействие шума смоделировано путем замены части голограммы двоичной случайной последовательностью. При длине случайного фрагмента в сигнале 70 % восстановленный сигнал превышает максимальное значение выброса шума на 11 дБ (рис. 6).

Увеличение длины кодовой комбинации приводит к возрастанию помехоустойчивости кода. При  $N = 1024$  выходной сигнал восстанавливается из сигнала, на 80 % состоящего из случайной

последовательности. Отношение сигнала к шумовому пику на выходе декодера равно 6,3 дБ (рис. 7).

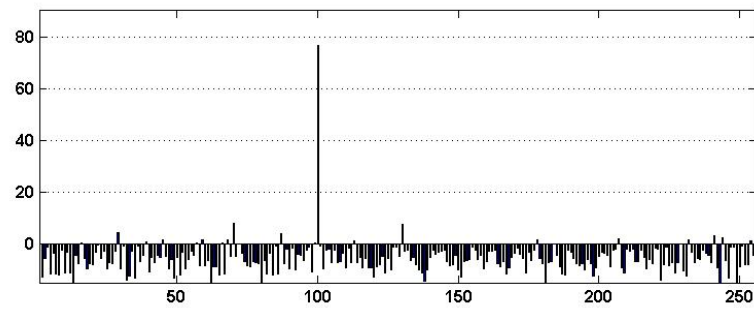


Рис. 4. Восстановленный сигнал при  $N = 256$

Fig. 4. Reconstructed signal at  $N = 256$

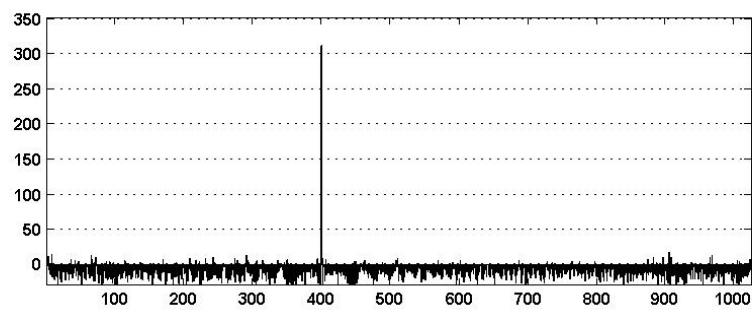


Рис. 5. Восстановленный сигнал при  $N = 1024$

Fig. 5. Reconstructed signal at  $N = 1024$

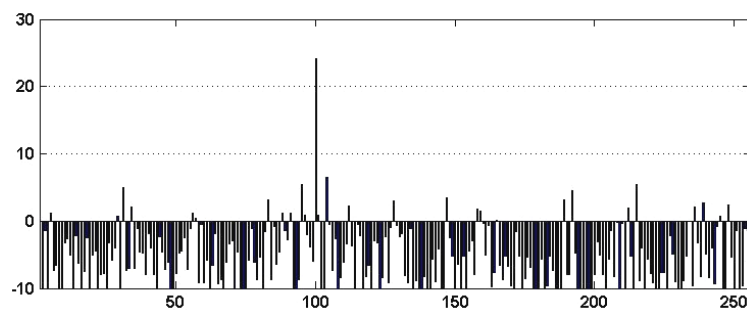


Рис. 6. Восстановленный сигнал при длине случайного фрагмента 70 %

Fig. 6. Reconstructed signal with a random fragment length of 70 %

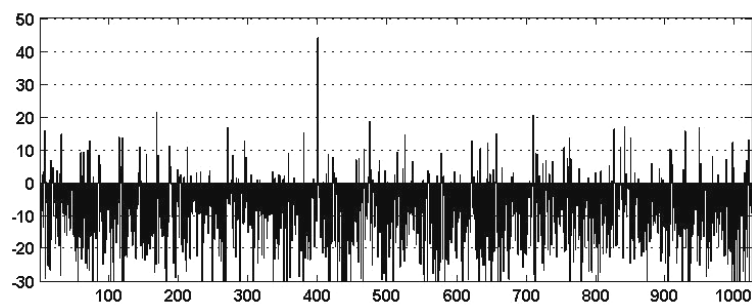


Рис. 7. Сигнал на выходе декодера при  $N = 1024$ . Длина случайного фрагмента 80 %

Fig. 7. Signal at the decoder output at  $N = 1024$ . Random fragment length 80 %



Если шум в канале искажает 90 % сигнала, необходимо увеличить длину кодовой комбинации до  $N = 4096$ , чтобы получить отношение сигнал/шум на выходе декодера 5 дБ (рис. 8).

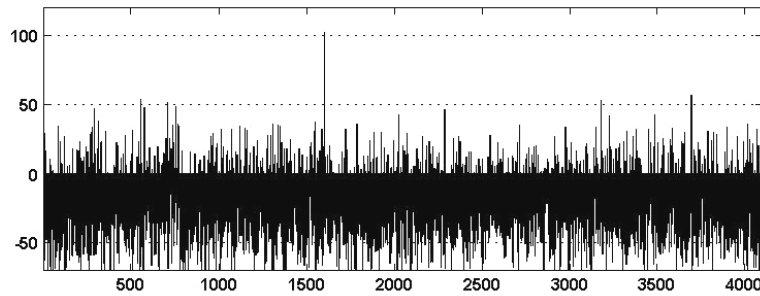


Рис. 8. Потери в канале 90 %. Восстановленный сигнал при  $N = 4096$

Fig. 8. Channel losses 90 %. Reconstructed signal at  $N = 4096$

Исследование зависимости корректирующей способности голографического кода от расстояния между объектом и голограммой  $L$ , шага голограммы  $d$  и длины волны  $\lambda$  показало, что наилучшие результаты достигаются при значениях  $L = nd$  и  $\lambda = d$ .

Рассмотрим возможности кода по исправлению ошибок.

Корректирующие способности помехоустойчивого кода, имеющего  $n = 2^k$  символов в кодовой комбинации, из которых  $k$  символов информационные, оцениваются максимальным количеством ошибок  $t$ , которые он может исправить при заданной степени избыточности, например, для кода Рида – Маллера (РМ-код)  $t = 2^{k-2} - 1$  [20], что соответствует исправлению ошибок любого вида, составляющих до 25 % длины кодового слова.

Одним из самых эффективных из известных кодов для исправления ошибок является код Рида – Соломона (РС-код), широко применяемый в помехоустойчивом кодировании, в системах восстановления данных с компакт-дисков, при создании архивов с возможностью восстановления информации в случае повреждений [21]. Предел корректирующей способности  $(n, k)$  РС-кода определен границей Синглтона [22], в соответствии с которой для исправления  $t$  ошибок код должен иметь не менее  $n - k = 2t$  проверочных символов, т. е. два проверочных символа на одну ошибку. При большой степени избыточности ( $n \gg k$ ) число исправляемых ошибок  $t$  приближается к 50 % от длины кодового слова  $n$ . Например, РС-код (255,8) с коэффициентом избыточности 32 устраняет 123 ошибки, при этом в кодовом слове содержится 132 верных символа – ошибки занимают 48 % кодового слова. Особенностью РС-кода является то, что столь высокую исправляющую способность он демонстрирует только для пакетных ошибок [21]. В то же время для большинства цифровых каналов, описываемых моделью двоичного симметричного канала без памяти, характерны случайные ошибки. Если перейти от пакетных ошибок к равномерно распределенным по кодовому слову случайным ошибкам, максимальное число исправляемых РС-кодом ошибок составит  $t = n / 2k - 1$ . Отсюда следует, что тот же вариант  $(n, k)$  РС-кода при  $n = 256, k = 8$  исправляет 15 случайных ошибок, что составляет 6 % длины кодового слова.

Для оценки помехоустойчивости голографического кода проведено сравнение надежности передачи информации по каналу с аддитивным белым гауссовским шумом при использовании нескольких кодов. Рассмотрена зависимость вероятности ошибки декодирования от отношения сигнал / шум в канале для РС-кода, РМ-кода, мажоритарного кода и голографического кода. Для этого взяты рассмотренные выше предельные количества исправляемых ошибок для каждого кода и построена зависимость вероятности появления числа ошибок не больше предельного от отношения сигнал / шум. Во всех случаях число разрядов исходного слова – 8, длина кодового слова – 256 бит (скорость кодов  $R = 1/32$ ). Результаты приведены на рис. 9.

Одним из наиболее надежных способов передачи информации в сильно зашумленных каналах является усреднение в пределах введенной избыточности с мажоритарным способом выбора решения. Однако оказалось, что голографический код является более помехоустойчивым и

обеспечивает выигрыш на 2 дБ по сравнению с мажоритарным кодом, что позволяет получить вероятность ошибки декодирования  $10^{-6}$  при отношении сигнал/шум  $S/N = -7$  дБ. Возможности предложенного голографического кода определяются уровнем введенной избыточности: при коэффициенте избыточности  $q = 32$  происходит безошибочное декодирование сигнала при замене 70 % сигнала случайной последовательностью, в то время как используемый в ГЛОНАСС код Хэмминга исправляет одну ошибку в 85-разрядном слове.

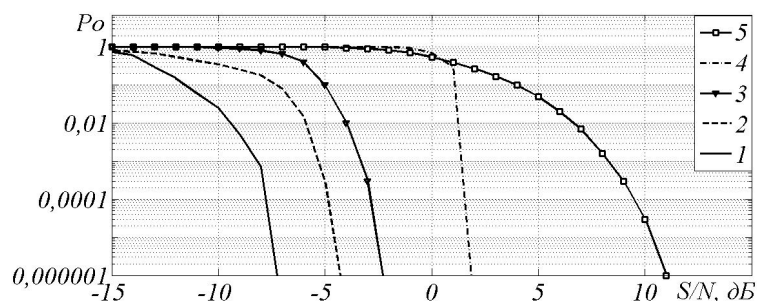


Рис. 9. Зависимость вероятности ошибки декодирования  $P_o$  от отношения сигнал / шум при скорости кода  $R = 1/32$ :

1 – голографический код; 2 – мажоритарный код; 3 – РМ-код; 4 – РС-код; 5 – без кодирования

Fig. 9. Dependence of the probability of decoding error  $P_o$  on the signal-to-noise ratio at code rate  $R = 1/32$ :

1 – holographic code; 2 – majority code; 3 – RM code; 4 – RS code; 5 – without coding

Все виды помехоустойчивого кодирования, в том числе и голографический код, требуют введения избыточности. Приведенные на рис. 9 результаты сравнения кодов получены при одинаковой скорости кода  $R = 1/32$ , т. е. при одинаковой 32-кратной избыточности. Другие коды работают и при небольшой избыточности, но с гораздо меньшей эффективностью. При использовании каналов связи с низким отношением сигнал / шум голографический код может повысить помехоустойчивость на порядок, но для этого необходимо введение как минимум 10-кратной избыточности. Это увеличивает объем передаваемой информации и при использовании того же канала связи увеличивает время передачи, а значит, и время определения координат. Поэтому возможности голографического кодирования в части длительности временного интервала определения координат необходимо соразмерять с поставленной задачей. Этот метод хорошо подходит для выполнения геодезических работ, но скорее всего, будет меньше востребован для измерения координат быстро движущихся объектов.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что введение голографического кодирования в канале спутниковой связи системы ГЛОНАСС даст возможность навигационной аппаратуре потребителей получать информацию с большего количества спутников за счет способности кода обеспечить возможность правильного декодирования сигнала при отношении сигнал / шум в спутниковом канале до  $-7$  дБ, что существенно повысит точность позиционирования. Возникающая при этом проблема увеличения задержки выдачи координат может быть решена двумя методами: повышением скорости передачи информации в спутниковом канале либо организацией дополнительного канала с голографическим кодированием с тем, чтобы модифицированная навигационная аппаратура работала в двух режимах – быстром с текущей точностью и медленном, но более точном.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 24-29-00080, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

**Acknowledgements.** The study was supported by the grant of Russian Science Foundation № 24-29-00080, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

### Библиографические ссылки

1. Пудловский В. Б. Выбор спутников ГЛОНАСС для снижения погрешности определения плановых координат // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Т. 6, № 3. С. 15–22.
2. Малогабаритный интегрированный навигационно-посадочный комплекс / Б. С. Алешин, Д. А. Антонов, К. К. Веремеенко и др. // Тр. МАИ. 2012. № 54 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29692>.
3. Валайтите А. А., Никитин Д. П., Садовская Е. В. Исследование влияния ошибки многолучевости на точность определения параметров сигналов ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем) при помощи имитатора навигационного поля // Тр. МАИ. 2014. № 77 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53172>.
4. Мальцев Г. Н., Сакулин А. Н., Сакулин Е. А. Потенциальная точность привязки подвижных измерительных пунктов по сигналам спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения. 2015. № 2. С. 57–64.
5. Рябов И. В., Романов И. С. Определение факторов, влияющих на точность позиционирования с помощью глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8, № 2. С. 167–170.
6. Цыремпилова Н. С., Хавронина Т. Е. Точность измерения навигационных параметров в навигационной аппаратуре потребителя спутниковой радионавигационной системы Глонасс, оснащенной антенной решеткой // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 1. С. 80–82.
7. Шаршавин П. В., Кондратьев А. С., Гребенников А. В. Применение цифровой регистрации для повышения точностных характеристик измерения псевдодальности по сигналам спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2012. Вып. 1 (41). С. 109–111.
8. Комплексная навигационная система летательного аппарата / А. Ю. Мишин, О. А. Фролова, Ю. К. Исаев, А. В. Егоров // Тр. МАИ. 2010. № 38 [Электронный ресурс]. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=14161>.
9. Иванов В. Ф., Кошкарров А. С. Повышение помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС за счет комплексирования с инерциальными навигационными датчиками // Тр. МАИ. 2017. № 93. С. 23–39.
10. Ткачев А. Б. Новые способы повышения помехоустойчивости сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Вестник МАИ. 2011. Т. 18. № 5. С. 72–77.
11. Российская навигационно-информационная спутниковая система / В. В. Дворкин, Р. В. Бакитко, В. В. Куршин, А. А. Поваляев // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5, № 3. С. 3–16. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.3.16.
12. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. М. : Росс. науч.-исслед. ин-т космич. приборостроения, 2008. 60 с.
13. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. 268 с.
14. Тимофеев А. Л. Использование голографического кодирования для повышения помехоустойчивости каналов связи // ИТпортал. 2018. Т. 18, № 2 [Электронный ресурс]. URL: <http://itportal.ru/science/tech/ispolzovanie-golograficheskogo-kodi>.
15. Применение голографического кодирования для повышения надежности передачи информации в зашумленных каналах связи / А. Л. Тимофеев, А. Х. Султанов, И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.8>.
16. Повышение срока активного использования бортовой электронной аппаратуры космических аппаратов / А. Л. Тимофеев, А. Х. Султанов, И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 1. С. 33–42. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-33-42.
17. Радиолокация с голографическим кодированием зондирующего сигнала / А. Л. Тимофеев, А. Х. Султанов, И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719>.

18. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Holographic method of error-correcting coding // Optical Technologies for Telecommunications 2018. 2019. Vol. 11146. P. 111461A. DOI: 10.1117/12.2526922.
19. Тимофеев А. Л., Султанов А. Х. Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 6. С. 978–984. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-739.
20. Кудряшов Б. Д. Основы теории кодирования. СПб. : БХВ-Петербург, 2016. 224 с.
21. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М. : Вильямс, 2007. 1104 с.
22. Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки. М. : Связь, 1979. 744 с.

## References

1. Pudlovsky V. B. [Selection of GLONASS satellites to reduce the error in determining plan coordinates]. *Raketno-kosmicheskoye priborostroyeniye i informatsionn-yye sistemy*. 2019, Vol. 6, No. 3, P. 15–22 (In Russ).
2. Aleshin B. S., Antonov D. A., Veremeenko K. K. et al. [Small-sized integrated navigation and landing complex]. *Tr. MAI*. 2012, No. 54 (In Russ). Available at: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29692>.
3. Valaityte A. A., Nikitin D. P., Sadovskaya E. V. [Study of the influence of multipath error on the accuracy of determining the parameters of GNSS (global navigation satellite systems) signals using a navigation field simulator]. *Tr. MAI*. 2014, No. 77 (In Russ). Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53172>.
4. Maltsev G. N., Sakulin A. N., Sakulin E. A. [Potential accuracy of binding of mobile measuring points using signals from the GLONASS satellite navigation system]. *Voprosy radioelektroniki, ser. Tekhnika teledeniya*. 2015, No. 2, P. 57–64 (In Russ.).
5. Ryabov I. V., Romanov I. S. [Determination of factors influencing positioning accuracy using global navigation satellite systems GPS and GLONASS]. *DSPA: Voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov*. 2018, Vol. 8, No 2, P. 167–170 (In Russ.).
6. Tsyrempilova N. S., Khavronina T. E. [Accuracy of measurement of navigation parameters in the navigation equipment of the consumer of the GLONASS satellite radio navigation system equipped with an antenna array]. *Aktual'n-yye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2015, Vol. 1, P. 80–82 (In Russ.).
7. Sharshavin P. V., Kondratyev A. S., Grebennikov A. V. [Application of digital registration to improve the accuracy of pseudo-range measurements using signals from satellite radio navigation systems GLONASS/GPS]. *Vestnik Sib. gos. aerokosmich. un-ta im. akad. M. F. Reshetneva*. 2012, No. 1 (41), P. 109–111 (In Russ.).
8. Mishin A. Yu., Frolova O. A., Isaev Yu. K., Egorov A. V. [Integrated navigation system of an aircraft]. *Tr. MAI*. 2010, No. 38 (In Russ). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=14161>.
9. Ivanov V. F., Koshkarov A. S. [Increasing the noise immunity of GLONASS consumer navigation equipment through integration with inertial navigation sensors]. *Tr. MAI*. 2017, No. 93, P. 23–39 (In Russ.).
10. Tkachev A. B. [New ways to increase the noise immunity of signals from global navigation satellite systems]. *Vestnik MAI*. 2011, Vol. 18, No. 5, P. 72–77 (In Russ.).
11. Dvorkin V. V., Bakitko R. V., Kurshin V. V., Povalyaev A. A. [Russian navigation and information satellite system]. *Raketno-kosmicheskoye priborostroyeniye i informatsionn-yye sistemy*. 2018, Vol. 5, No. 3, P. 3–16 (In Russ). DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.3.16.
12. *GLONASS. Interfeysnyy kontrol'nyy dokument* [GLONASS. Interface control document (revision 5.1)]. Moscow, 2008, 60 p.
13. Soloviev Yu. A. *Sistemy sputnikovoy navigatsii* [Satellite navigation systems]. Moscow, ECO-TRENDS Publ., 2000, 268 p.

14. Timofeev A. L. [Using holographic coding to increase the noise immunity of communication channels]. *ITportal*. 2018, Vol. 18, No. 2. (In Russ). Available at: <http://itportal.ru/science/tech/ispol-zovanie-golograficheskogo-kodi>.
15. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Meshkov I. K., Gizatulin A. R. [Application of holographic coding to increase the reliability of information transmission in noise communication channels]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2024, No. 6 (In Russ). Available at: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.8>.
16. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Meshkov I. K., Gizatulin A. R. [Increasing the period of active use of on-board electronic equipment of spacecraft]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 1, P. 33–42. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-33-42.
17. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Meshkov I. K., Gizatulin A. R. [Radar with holographic coding of probing signal]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2024, No. 3. Available at: <https://doi.org/10.30898/1684-1719>.
18. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Holographic method of error-correcting coding. *Optical Technologies for Telecommunications 2018*. 2019, Vol. 11146, P. 111461A. DOI: 10.1117/12.2526922.
19. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. [Construction of an error-resistant code based on a holographic representation of arbitrary digital information]. *Komp'yuternaya optika*. 2020, Vol. 44, No. 6, P. 978–984. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-739.
20. Kudriashov B. D. [Fundamentals of coding theory]. *Osnovy teorii kodirovaniya*. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2016, 224 p.
21. Sklar B. [Digital Communications: Fundamentals and Applications]. Moscow, Vil'yams Publ., 2007, 1104 p.
22. Williams F. J. Mac, Sloane N. J. A. *Teoriya kodov, ispravlyayushchikh oshibki* [The Theory of Error-Correction Codes]. Moscow, Svyaz' Publ., 1979, 744 p.

© Тимофеев А. Л., Султанов А. Х., Мешков И. К., Гизатулин А. Р., 2024

---

**Тимофеев Александр Леонидович** – кандидат технических наук, доцент; Уфимский университет науки и технологий. E-mail: [a\\_l\\_t@inbox.ru](mailto:a_l_t@inbox.ru). <https://orcid.org/0000-0003-2137-803X>

**Султанов Альберт** – доктор технических наук, профессор; Уфимский университет науки и технологий. E-mail: [tks@ugatu.ac.ru](mailto:tks@ugatu.ac.ru). <https://orcid.org/0000-0002-2830-3498>

**Мешков Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент; Уфимский университет науки и технологий. E-mail: [mik.ivan@bk.ru](mailto:mik.ivan@bk.ru). <https://orcid.org/0000-0003-3479-3072>

**Гизатулин Азат Ринатович** – кандидат технических наук, доцент; Уфимский университет науки и технологий. E-mail: [azat\\_poincare@mail.ru](mailto:azat_poincare@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0002-0753-0608>

**Timofeev Aleksandr Leonidovich** – Cand. Sc., Docent, Ufa University of Science and Technology. E-mail: [a\\_l\\_t@inbox.ru](mailto:a_l_t@inbox.ru). <https://orcid.org/0000-0003-2137-803X>

**Sultanov Albert Khanovich** – Dr. Sc., Professor, Ufa University of Science and Technology. E-mail: [tks@ugatu.ac.ru](mailto:tks@ugatu.ac.ru). <https://orcid.org/0000-0002-2830-3498>

**Meshkov Ivan Konstantinovich** – Cand. Sc., Docent, Ufa University of Science and Technology. E-mail: [mik.ivan@bk.ru](mailto:mik.ivan@bk.ru). <https://orcid.org/0000-0003-3479-3072>

**Gizatulin Azat Rinatovich** – Cand. Sc., Docent, Ufa University of Science and Technology. E-mail: [azat\\_poincare@mail.ru](mailto:azat_poincare@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0002-0753-0608>

---

Статья поступила в редакцию 05.02.2024; принята к публикации 02.11.2024; опубликована 26.12.2024  
The article was submitted 05.02.2024; accepted for publication 02.11.2024; published 26.12.2024

УДК 621.396.96

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-493-506

**Для цитирования:** Динамические параметры потока в естественных криволинейных координатах для линии тока во вращающемся канале / В. В. Черненко, Д. В. Черненко, М. И. Толстомятов и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 493–506. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-493-506.

**For citation:** Chernenko V. V., Chernenko D. V., Tolstomyatov M. I. et al. [Dynamic flow parameters in natural curvilinear coordinates for a current line in a rotating channel]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 493–506. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-493-506.

## Динамические параметры потока в естественных криволинейных координатах для линии тока во вращающемся канале

В. В. Черненко\*, Д. В. Черненко, М. И. Толстомятов,  
Э. С. Манохина, Е. В. Фалькова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: 2887722@mail.ru

Особый интерес к теме математического анализа протекания процессов переноса теплоты определяется научной значимостью и практическим применением при разработке, проектировании и производстве ракетно-космических аппаратов и установок. Обоснование разработанных методик и моделирование данных, полученных в ходе эксперимента с применением 3д технологий процесса, дает преимущество. Точность и достоверность результатов расчетов играют ключевую роль в обеспечении безопасности и надежности ракетно-космических систем. Регулярная проверка и верификация результатов также необходимы для обеспечения высокой степени надежности и безопасности. Представленный в статье комплексный анализ течения потока жидкости в межлопаточном канале рабочего колеса малорасходного центробежного насоса с построением энергетических характеристик рабочего колеса может быть использован для уточнения числа лопаток. Разработанная методика расчета состоит из четырех частей: во-первых, получено выражение для определения проекции градиента давления на продольную ось  $\varphi$ , во-вторых, получено выражение для определения проекции градиента давления на поперечную ось  $\psi$ , в-третьих, определена производная продольной скорости в поперечном направлении и, в-четвертых, представлены результаты численной и экспериментальной визуализации (баланс мощностей, зависимость напора и коэффициента влияния конечного числа лопаток от расхода малорасходного центробежного насоса). На основе результатов теоретических исследований были разработаны алгоритм и программа расчета, позволяющие рассчитывать локальные значения. Рассматриваемый подход подтверждается верификацией результатов математического моделирования графической визуализацией течения и измерением баланса мощностей малорасходного центробежного насоса. Полученные выражения для проекций градиента давления, определение производной продольной скорости и экспериментальная визуализация играют важную роль при расчете и анализе работы центробежных насосов. Однако существует необходимость в дальнейшей проработке метода для приведения его к виду, позволяющему рассчитывать трехмерное течение рабочего тела в канале произвольной формы.

**Ключевые слова:** центробежный насос, рабочее колесо, напор, оптимизация, градиент скорости, градиент давления, баланс мощностей.

## Dynamic flow parameters in natural curvilinear coordinates for a current line in a rotating channel

V. V. Chernenko\*, D. V. Chernenko, M. I. Tolstopyatov,  
E. S. Manokhina, E. V. Fal'kova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\* E-mail: 2887722@mail.ru

*A special interest in the topic of mathematical analysis of the flow of heat transfer processes is determined by the scientific significance and practical application in the development, design and production of rocket and space vehicles and installations. Substantiation of the developed techniques and modeling of the data obtained during the experiment using 3D process technologies gives an advantage. The accuracy and reliability of the calculation results play a key role in ensuring the safety and reliability of rocket and space systems. Regular verification and verification of the results are also necessary to ensure a high degree of reliability and safety. The comprehensive analysis of the fluid flow in the inter-vane channel of the impeller of a low-flow centrifugal pump presented in the article, with the construction of the energy characteristics of the impeller, can be used to clarify the number of vanes. The developed calculation method consists of four parts: firstly, an expression is obtained to determine the projection of the pressure gradient on the longitudinal axis  $\varphi$ , secondly, an expression is obtained to determine the projection of the pressure gradient on the transverse axis  $\psi$ , thirdly, the derivative of the longitudinal velocity in the transverse direction is determined, and fourthly, the results are presented numerical and experimental visualization: the power balance, the dependence of the pressure and the coefficient of influence of a finite number of vanes on the flow rate of a low-flow centrifugal pump. Based on the results of theoretical research, an algorithm and a calculation program were developed that allows calculating local values. The considered approach is confirmed by verification of the results of mathematical modeling by graphical visualization of the flow and measurement of the power balance of a low-flow centrifugal pump. The obtained expressions for pressure gradient projections, determination of the derivative of the longitudinal velocity and experimental visualization play an important role in the calculation and analysis of the operation of centrifugal pumps. However, there is a need for further elaboration of the method to bring it to a form that allows calculating the three-dimensional flow of the working fluid in an arbitrary channel.*

*Keywords: centrifugal pump, impeller, head, optimization, speed gradient, pressure gradient, power balance.*

### Введение

Одним из важнейших пунктов в развитии и проектировании новых образцов ракетно-космических и авиационных систем является традиционное обеспечение максимально высоких параметров по энергетическим характеристикам, ресурсу и степени надежности как отдельных агрегатов, элементов конструкции, так и аппарата в целом. Критерии обслуживания целевых эксплуатационных показателей могут определяться путем последовательной детерминации, основанной на причинно-следственной связи, на протяжении всего эксплуатационного цикла технической системы. Этот процесс включает в себя обоснование тактико-технических требований, разработку технического задания на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, эскизное проектирование, разработку конструкторской и технической документации; доводочные испытания и производство. Поэтому даже незначительная погрешность на этапе предполагаемых результатов новых разработок может многократно увеличить стоимость следующих этапов или прекратить проект.

Для достижения оптимально высоких энергетических характеристик центробежного насоса необходимо получить и использовать максимально полное преобразование энергии в межлопа-

точном канале рабочего колеса. В частности, именно преобразование энергии в межлопаточном канале рабочего колеса играет ключевую роль в обеспечении высокой эффективности таких установок. Результаты исследований и рекомендации по проектированию, изложенные в различных классических и современных работах, имеют большое значение для развития эффективных двигательных установок, включая теплоэнергетические установки летательных аппаратов. Для обеспечения подачи требуемого напора необходимых расходных параметров с заданным повышением давления рабочего тела главным образом применяются центробежные насосные агрегаты, имеющие высокие энергетические характеристики при относительно малой массе и габаритах. Система двигательной установки летательного аппарата включает в себя насосы, которые отвечают за подачу топлива в камеру сгорания с электроприводом и турбодвигателем, которые применяются в жидкостных ракетных ступенях космических аппаратов. В гидравлических системах приводов исполнительных элементов систем управления вектором тяги и механизации центробежные насосы являются источником мощности [1–5].

Необходимо подчеркнуть, что центробежные насосы распространены во многих сферах индустрии (нефтепромышленности, энергетике, фармацевтике, транспортной, пищевой, химической отраслях, криогенике и др.), где насущным является вопрос о снижении вибрации, пульсации давления, шума. Применение в насосах более совершенной проточной части способствует решению этих проблем [6].

Производительность центробежного насоса определяется высокой угловой скоростью его рабочего колеса, например РД0146, имеющий частоту вращения до 123000 об/мин. При перекачивании высоковязких сред центробежные насосы становятся менее продуктивны: большое сопротивление и высокое давление рабочей среды снижают поддержание определенной скорости потока. Актуальной задачей является теоретическое исследование движения потока в каналах проточной части центробежных лопаточных нагнетателей. Именно эта задача и показывает существенные недостатки, так как значительная часть каналов имеет изменяющиеся площади и сложные пространственные формы с наличием зон пониженного и повышенного градиента давления с возможным наличием парного вихря, что приводит к скосу донных линий тока и кривизны средней линии. Все эти каналы находятся во вращении, и протекающий по ним поток напрямую взаимодействует с лопатками и тем самым повышает свою удельную энергию [4]. Межлопаточный канал в рабочем колесе является важным элементом. В турбинах жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) используются неохлаждаемые лопатки. Кроме того, используются различные по направлению движения потока типы турбин – радиальные, осевые, диагональные – с различными профилями межлопаточных каналов. Увеличение температуры рабочего тела также способствует повышению адиабатной работы. Из-за конструктивных особенностей и применяемых материалов на температуру рабочего тела в неохлаждаемой турбине накладываются ограничения, обычно для восстановительного газа 1000–1200 °С, для окислительного газа 700–900 °С [7].

Наличие градиента давления в потоке движущегося по межлопаточному каналу рабочего тела, а следовательно, и в пограничном слое, значительно усложняет вычислительную задачу последнего. Однако, учитывая практическую значимость этого вопроса, он привлек внимание многих исследователей и в настоящее время разрабатываются различные алгоритмические подходы к решению, основанные на приближенных предположениях и эмпирических данных [7–9].

Многие научные исследования рассматривают свойства турбулентного пограничного слоя. Важное значение занимают исследования консервативных свойств пограничного слоя. Материалы исследований объясняют свойства турбулентных пограничных слоев, описывают проблему с трением и теплообменом при движении рабочего тела (жидкости) по каналам и проточным частям (термодинамически). Также рассматриваются теоретические законы предельных трений и теплообмена поверхностей тел. Основным моментом является то, что турбулентность потока пристеночного участка очень незначительно влияет на внешние изменения нескольких показателей осредненного потока. В зависимости от предельных относительных законов трения и теплообмена были предложены методы математического расчета. В турбулент-



ном потоке с продольным градиентом давления с теплообменом в пристеночной области профиль скорости представляется логарифмическим законом и от градиента давления практически не зависит, но на распределение скорости во внешней части турбулентного пограничного слоя, составляющей более 75 % от его толщины, градиент давления оказывает повышенное влияние. Влияние возмущения не меняет форму математических описаний пограничного слоя, а является параметрическим. Понимание физических особенностей движения потоков в каждом элементе проточной части центробежного насосного агрегата позволит разработать методики расчета и проектирования, учитывающие особенности течения в сложных пространственных каналах. Наиболее сложной частью исследования и математического описания является пограничный слой на криволинейной (сферической) поверхности. На такой поверхности имеется точка отрыва, высокий градиент давления, а производная скорости потока меняет знак. Метод баланса импульса используется для определения корректировочных параметров в потоке [4; 6; 9–18].

При расчете поля скорости необходимо провести дополнительный анализ распределения полей давлений. Распределение давлений в межлопаточном канале оказывает значительное влияние на динамику потока жидкости и, следовательно, на энергетические характеристики центробежного рабочего колеса. Такой анализ позволяет более полно и точно определить характеристики потока, что важно для разработки эффективных методик оптимизации и проектирования рабочих колес. Для определения градиента давления отсутствуют уравнения в явной форме, но при этом параметр давления входит в основное уравнение количества движения. Если поле давления определено, то уравнение решается без особых трудностей, но при этом отсутствует очевидный способ определения поля давлений. Имеется возможность использовать уравнение неразрывности для определения поля давлений. Поле давлений необходимо определить таким образом, чтобы при его использовании в уравнениях количества движения получаемое поле скоростей удовлетворяло уравнению неразрывности. Для определения поля давления наилучшим образом подходит использование дискретных аналогов уравнений количества движения и неразрывности, поскольку остальные не подходят для нашего решения. Из-за сложностей с нахождением давлений разработаны методы, выводящие давление из системы определяющих уравнений [19–21].

### **Цель**

Целью является разработка методики расчета и анализ влияние градиента давления на распределение скорости в пристеночной части в межлопаточном канале центробежного рабочего колеса с конечным числом лопаток, определение по расчетной методике энергетические характеристики рабочего колеса и проведение оптимизации по конечному числу лопаток, а также графическая визуализация балансов мощностей малорасходного центробежного насоса.

### **Методика исследования**

Изучение существующих методов расчета турбулентного пограничного слоя с градиентом давления с использованием интегрального уравнения импульсов позволяет получить два приближенных решения уравнения пограничного слоя, включая уравнение, учитывающее особенности течения с продольным градиентом давления. Эти решения включают уравнение, учитывающее особенности потока с продольным градиентом давления. Таким образом, можно провести анализ приближенного уравнения турбулентного пограничного слоя. В дальнейших расчетах будут использоваться методы расчета турбулентного пограничного слоя с градиентом давления, учитывая, что полученные решения критериальных уравнений справедливы только при конфузормом процессе течения потока. Эти методики предполагают использование толщины потери импульса в качестве характеристической толщины пограничного слоя.

Введение дополнительных параметров для описания профиля скоростей является важным шагом при учете сильной зависимости характеристик от градиента давления. Эти дополнительные параметры могут помочь более полно и точно описать сложные зависимости между давлением и скоростью внутри межлопаточного канала. Такой подход позволяет получить более реалистичное представление о динамике потока жидкости и, соответственно, энергетических

характеристиках центробежного рабочего колеса. Толщина потери импульса для расчета определяется по теореме импульсов, в которой касательное напряжение на стенке определяется на основе закона сопротивления продольно обтекаемой пластины. Эти методики используются для определения сопротивления трения кузовов с различными профилями и показывают положительные результаты.

В данном случае используется специальное координатное преобразование для создания более равномерного распределения параметров потока по всему пространству. При переходе к расчету динамических параметров потока в естественных криволинейных координатах для линии тока во вращающемся межлопаточном канале проводится анализ установившегося потока идеальной жидкости с учетом трения. Графический расчет выполняется в полярной системе координат, которая является оптимальной в случаях, когда отношения между точками легче изобразить в виде радиусов и углов.

### Проекция градиента давления на продольную ось $\varphi$

Продольная координатная линия  $\varphi$  по определению является проекцией предельной линии тока в ядре потока на ограничивающую поверхность. В нашем случае это внутренняя поверхность покрывного диска в конкретной точке криволинейной линии  $\varphi$ . Направление относительной скорости  $\vec{W}$  касательно к этой линии (рис. 1).

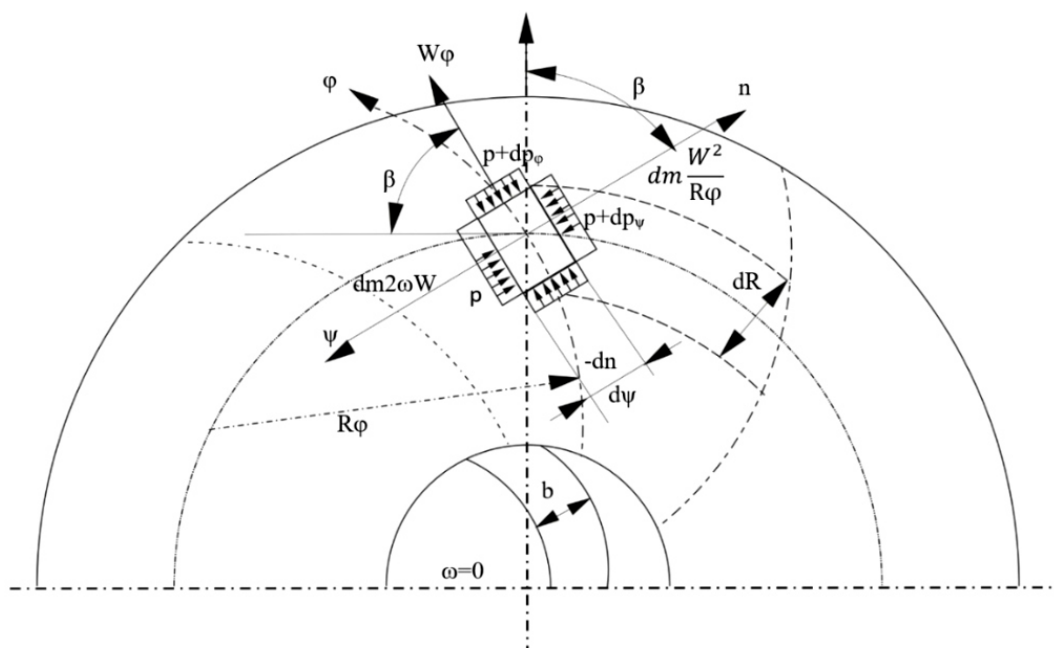


Рис. 1. Расчетная схема ядра потока

Fig. 1. Calculation scheme of the flow core

Для установившегося относительного движения без учета трения в ядре потока уравнение движения приобретает вид уравнения Эйлера, которое в проекции на продольную координатную линию запишется в виде

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{W^2}{2} \right) = F_{\varphi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi}, \quad (1)$$

где  $\partial \varphi$  – элемент продольной координатной линии;  $F_{\varphi}$  – проекция суммы инерционных сил на координату  $\varphi$ , отнесенная к единице массы, что соответствует инерционному ускорению, взятому с противоположным знаком.

При относительном движении во вращающемся межлопаточном канале рабочего колеса к инерционным силам относятся:

- центробежные силы инерции от вращения рабочего колеса  $\omega^2 R$ ;
- центробежная сила инерции из-за кривизны линии тока (координатной линии  $\varphi$ )  $\frac{W^2}{R}$ ;
- кориолисова сила инерции  $2\omega W$ .

Силой тяжести и внешними инерционными силами пренебрегаем.

Связанная с рабочим колесом составляющая центробежной силы от вращения координат равна:

$$\omega^2 R \sin \beta = \omega^2 R \frac{dR}{d\varphi'}, \quad (2)$$

где  $\sin \beta = \frac{dR}{d\varphi'}$ , (см. рис. 1).

Проекция этой центробежной силы  $\frac{W^2}{R_\varphi}$ , которая возникает в связи с наличием кривизны по линии тока, и кориолисовой силы  $2\omega W$  на направление  $\varphi$  будет равняться нулю из-за перпендикуляра относительной скорости. Тогда  $F_\varphi = \sum F_{\text{фин}}$ , запишется [22]:

$$F_\varphi = \omega^2 R \frac{\partial R}{\partial \varphi}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), получим

$$\frac{\partial \left( \frac{W^2}{2} \right)}{\partial \varphi} = \omega^2 R \frac{\partial R}{\partial \varphi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_\varphi}{\partial \varphi}.$$

Преобразовав в приращение кинетических энергий, получим:

$$\frac{\partial \left( \frac{W_\varphi^2}{2} \right)}{\partial \varphi} - \frac{\partial \left( \frac{U^2}{2} \right)}{\partial \varphi} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi}.$$

Получаем выражение для проекции градиента давления на продольную ось  $\varphi$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{U^2}{2} - \frac{W_\varphi^2}{2} \right), \quad (4)$$

где  $W_\varphi$  – скорость в относительном движении, касательная продольной координате  $\varphi$ ;  $U = \omega R$  – переносная скорость в конкретной точке на линии тока, или

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = W \frac{\partial W}{\partial \varphi} - \frac{\omega^2 R dR}{d\varphi}. \quad (5)$$

### Проекция градиента давления на поперечную ось $\psi$

Выделим в межлопаточном канале элементарный объем жидкости с массой  $dm = \rho \cdot b \cdot d\psi \cdot d\varphi$ , где  $b$  – ширина канала в направлении, перпендикулярном плоскости (см. рис. 1).

Рассмотрим равновесие элементарного объема жидкости в проекции на поперечную координатную ось  $\psi$ , противоположную нормали  $n$  к предельной линии тока в относительном движении. На выделенный объем действуют следующие составляющие сил (см. рис. 1):

– поверхностные силы давления, суммарная составляющая которых равна:

$$+\partial p_{\varphi} \cdot b \cdot d\varphi;$$

– составляющая центробежной силы инерции, возникающая из-за кривизны линии тока  $\varphi$ :

$$-dm \cdot \omega^2 R \cdot \cos \beta = dm \cdot \omega^2 R \cdot \frac{\partial R}{\partial \varphi};$$

– составляющая центробежной силы инерции, возникающая из-за кривизны линии тока  $\psi$ :

$$-dm \cdot \frac{W^2}{R\varphi};$$

– составляющая кориолисовой силы инерции:

$$+\partial m \cdot 2\omega W.$$

Из условия равновесия сумма всех составляющих равна нулю:

$$+\partial p_{\varphi} \cdot b \cdot d\varphi - dm \cdot \omega^2 R \cdot \frac{\partial R}{\partial \varphi} - dm \frac{W^2}{R\varphi} + dm \cdot 2\omega W = 0.$$

Разделим и умножим первый член уравнения (5) на  $\rho d\psi$ , сократим все члены на  $dm = \rho \cdot b \cdot d\psi \cdot d\varphi$  и получим уравнение:

$$+\frac{\partial p}{\rho \partial \psi} - \frac{\omega^2 R_{\varphi} dR}{\partial \psi} - \frac{W^2}{R_{\varphi}} + 2\omega W = 0 \quad (6)$$

или

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = -\omega^2 R \cdot \cos \beta - \frac{W^2}{R_{\varphi}} + 2\omega W, \quad (7)$$

– производная статического давления по координате  $\psi$ , где  $R_{\varphi}$  – радиус кривизны предельной линии тока, в нашем расчетном случае  $R_{\varphi} = R_{\text{л}} = \text{const}$  лопаточный угол –  $\beta_{\text{л}} = f(\varphi)$ .

Необходимо отметить следующее: направление нарастания (увеличения) статического давления совпадает с направлением инерционной силы (и противоположно инерционному ускорению элементарной массы жидкости).

Поперечные волны возникают из-за деформации формы, т. е. малых вращательных движений частиц окружающей среды на плоскости, направленной в направлении распространения колебаний. Объем в среде неизменен, но происходит локальная деформация прямоугольного элемента среды, и, таким образом, S-волна называется волной движения. Поперечная волна не распространяется в жидкой и газовой среде, где слабое сцепление элементов вещества не позволяет передавать сдвиговые деформации.

### Производная продольной скорости в поперечном направлении

Используя выражение (5) для продольного градиента статического давления, умножив части на  $d\varphi$ , получаем

$$-\frac{1}{\rho} dp = W dW - \omega^2 R dR. \quad (8)$$

Интегрируя уравнения по струйке тока от сечения 1-1 до сечения 2-2, получаем выражение для статического напора несжимаемой жидкости:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} = \frac{U_2^2 - W_2^2}{2} - \frac{U_1^2 - W_1^2}{2}. \quad (9)$$

Полагая, что энергия струек по шагу постоянна [3], из уравнения (8) получаем следующее соотношение:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = W \frac{dW}{d\psi} - \omega^2 R \frac{dR}{d\psi}. \quad (10)$$

Используя выражение (8) для первого числа (1), получаем:

$$-\frac{\omega^2 R dR}{d\psi} - \frac{W^2}{R_\varphi} + 2\omega W = W \frac{dW}{d\psi} - \omega^2 R \frac{dR}{d\psi}.$$

После сокращения членов и деления на  $W$  получаем выражение для производной продольной скорости  $W_u$  в поперечном направлении  $\psi$ :

$$\frac{\partial W_u}{d\psi} = 2\omega - \frac{W}{R_\varphi}. \quad (11)$$

Продольные волны всегда распространяются быстрее поперечных в одном и том же пространстве, вызванные изменением объема при поступательном движении частиц в сторону распространения колебаний упругости. Известно также, что волны продольного типа распространяются при скорости  $V_p$ , которая определяется упругостью и плотностью сред. Таким образом, среда (твердая, однородная, изотропная) будет распространяться независимо от времени и пространства.

### Баланс мощностей

Согласно проведённому эксперименту с распределением мощности насоса получаем численные интегральные гидравлические потери. Часть затрачиваемой мощности превращается в полезную работу, остальное уходит в потери [3; 9; 10].

Таким образом, баланс эффективной мощности насоса будет

$$N_{\text{ПОЛ}} = N_{\text{ЗАТР}} - (N_{\text{ГТ}} + N_{\text{Г}} + N_{\text{УТ}} + N_{\text{МEX}}^{\text{СТ}} + N_{\text{МEX}}^{\text{КОЛ}}).$$

Составляющие баланса мощностей в нагнетателе (насосе):  $N_{\text{ПОЛ}}$  – полезная мощность насоса;  $N_{\text{ЗАТР}}$  – мощность затраченная;  $N_{\text{ГТ}}$  – мощность, расходуемая на трение (гидравлическое);  $N_{\text{Г}}$  – потери (гидравлические) в проточной части насоса;  $N_{\text{УТ}}$  – потери мощностей с утечками рабочей жидкости;  $N_{\text{МEX}}^{\text{СТ}}$  – потери при контакте с неподвижными частями – опоры, уплотнения;  $N_{\text{МEX}}^{\text{КОЛ}}$  – механические потери мощности в рабочем колесе.

На рис. 2 и 3 показаны графические зависимости величин потерь. Полученные энергетические характеристики совпадают с результатами исследования с погрешностью, не превышающей 3–5 %. Это дает возможность утверждать, что разработанная методика верна и верифицирована.

На рис. 2 представлены результаты численной и экспериментальной визуализации: баланс мощностей, зависимость напора и  $K_z$  от расхода малорасходного центробежного насоса для цилиндрических лопаток,  $\beta_{1\text{л}} = \beta_{2\text{л}} = 60^\circ$ . На рис. 3 – баланс мощностей, зависимость напора и  $K_z$  от расхода малорасходного центробежного насоса для тангенциальных лопаток,  $\beta_{2\text{л}} = 77^\circ$ .

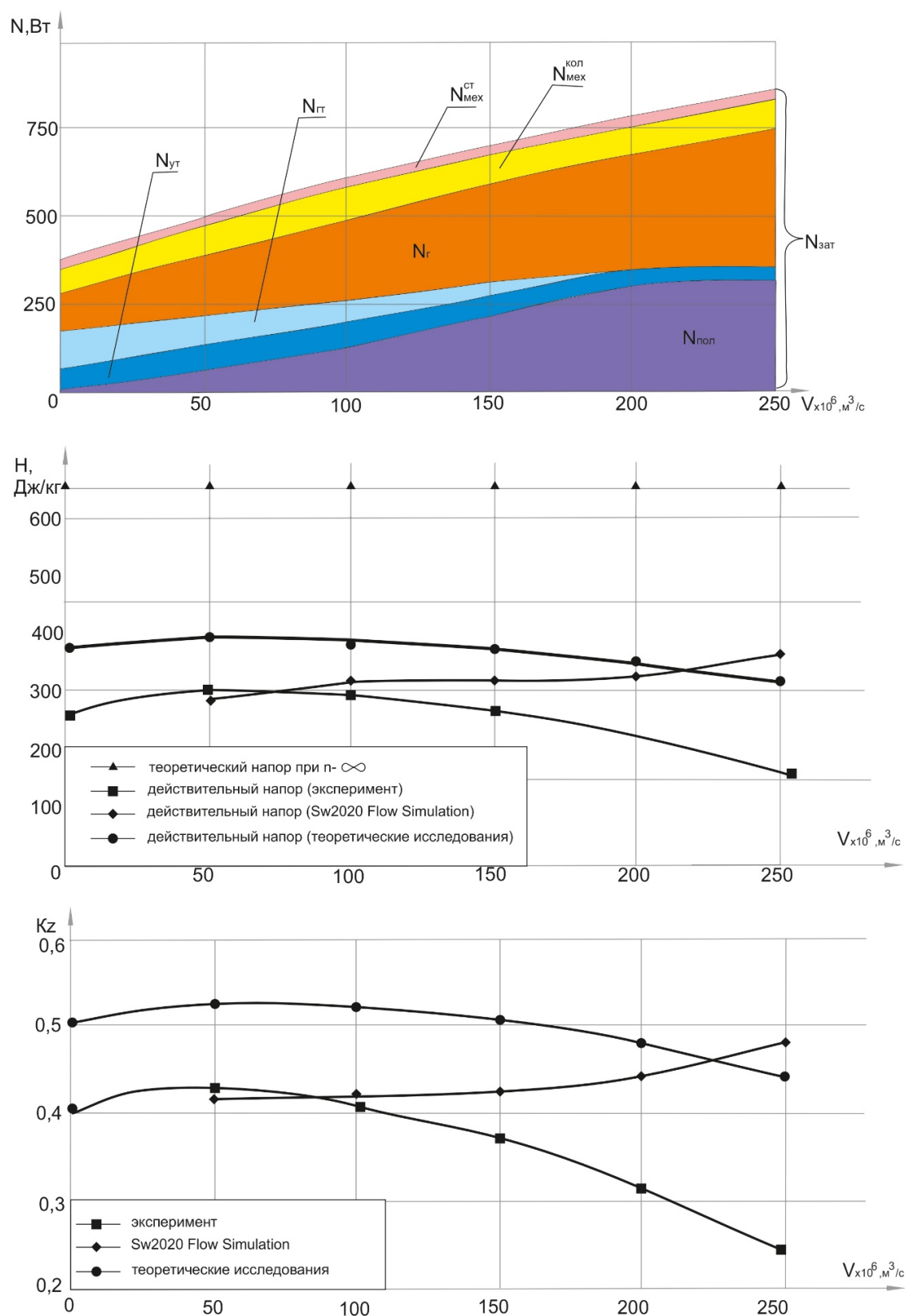


Рис. 2. Баланс мощностей, зависимость напора и  $K_z$  от расхода малорасходного центробежного насоса (цилиндрические лопатки,  $\beta_{1л} = \beta_{1л} = 60^\circ$ )

Fig. 2. Power balance, dependence of pressure and  $K_z$  on the flow rate of a low-flow centrifugal pump (cylindrical blades,  $\beta_{1л} = \beta_{1л} = 60^\circ$ )

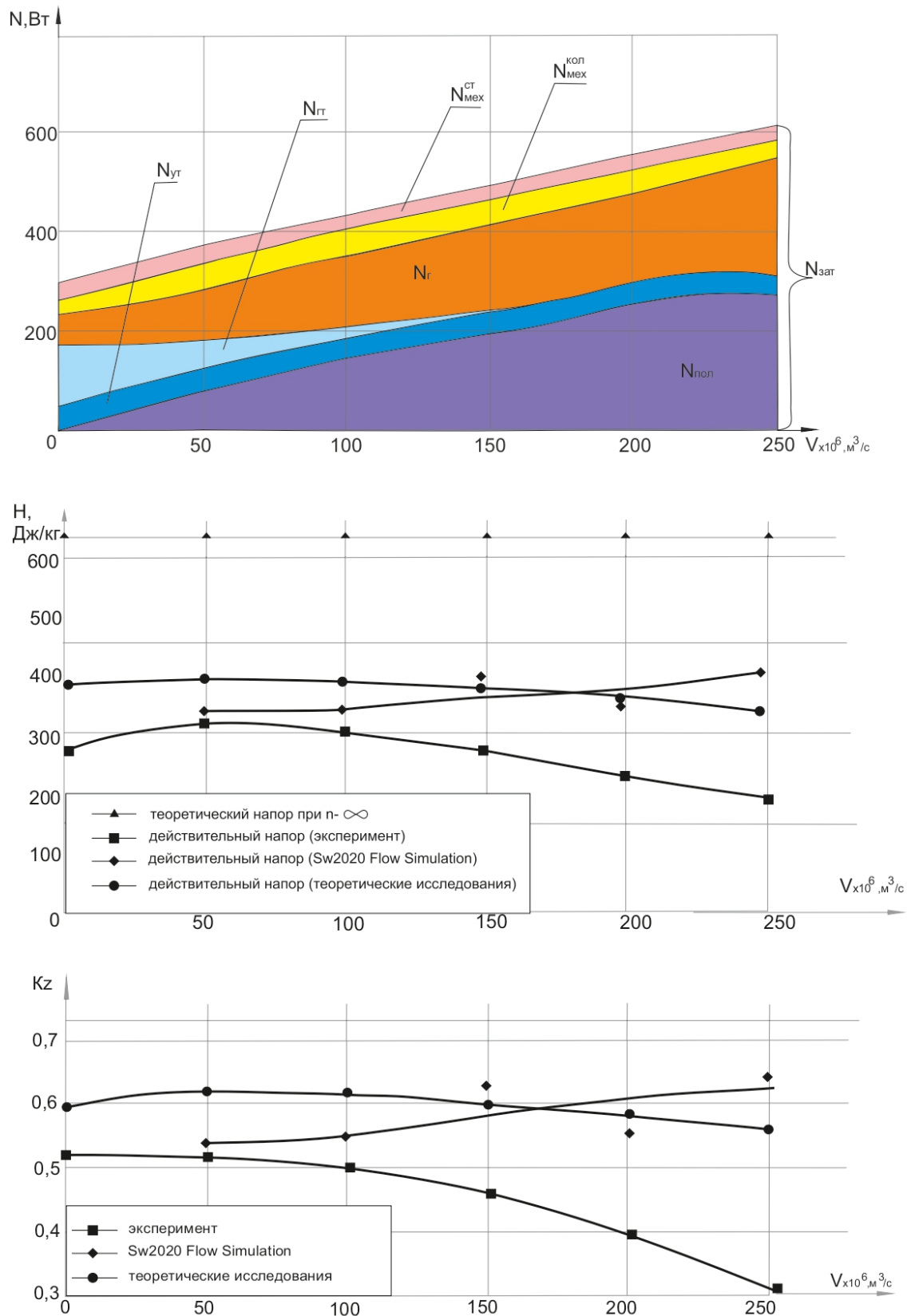


Рис. 3. Баланс мощностей, зависимость напора и  $K_z$  от расхода малорасходного центробежного насоса (тангенциальные лопатки,  $\beta_{2л} = 77^\circ$ )

Fig. 3. Power balance, dependence of pressure and  $K_z$  on the flow rate of a low-flow centrifugal pump (tangential blades,  $\beta_{2л} = 77^\circ$ )

## Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- получена новая форма уравнения импульсов пространственного пограничного слоя для ламинарного относительного потока с продольно-поперечным градиентом давления, совмещенная с законом трения, определенным из классического параболического профиля;
- по результатам исследований получены выражения для проекции градиента давления на продольную ось  $\varphi$ ;
- получена производная статического давления по координате  $\psi$ ;
- получены выражения для производной продольной скорости  $W_u$  в поперечном направлении  $\psi$  в естественной системе координат при течении в круговом секторе;
- построены графики балансов мощностей, зависимость напора и  $K_z$  от расхода малорасходного центробежного насоса (цилиндрические лопатки,  $\beta_{1л} = \beta_{2л} = 60^\circ$ ) и (тангенциальные лопатки,  $\beta_{2л} = 77^\circ$ ).

Однако метод требует дальнейшей доработки с целью приведения его к форме, позволяющей сделать расчет трехмерного течения рабочего колеса в канале произвольной формы. Результаты всех частей исследования будут использоваться для расчета оптимизации конечного числа лопаток в рабочем колесе насоса.

## Библиографические ссылки

1. Филин Н. А., Мкртчян М. К. Малоизвестные факты истории создания турбонасосного агрегата в жидкостном ракетном двигателе // Вестник Моск. авиац. ин-та. 2021. Т. 28, № 13. С. 63–73.
2. Назаров В. П., Яцуненко В. Г., Коломенцев А. И. Конструктивно-технологические факторы стабильности энергетических параметров турбонасосных агрегатов ракетных двигателей // Вестник Моск. авиац. ин-та. 2014. Т. 21, № 5. С. 101–105.
3. Зуев А. А., Арнгольд А. А., Данилов Н. А. Баланс мощностей центробежных насосов энергетических систем летательных и космических аппаратов // Решетневские чтения. 2020. С. 132–133.
4. Назаров В. П., Черненко В. В., Черненко Д. В. Модель течения в рабочем колесе центробежного насоса // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 3. С. 494–503. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-3-494-503.
5. Zuev A. A., Arngold A. A., Tolstopyatov M. I. Flow with heat transfer in a rotating cavity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Workshop Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019. 2019. P. 22026. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022026.
6. Корочинский В. В. Разработка трубчатых направляющих аппаратов в отводах высокооборотных центробежных насосов с целью снижения вибрации и увеличения ресурса работы : дисс. ... канд. техн. наук. М., 2017. 119 с.
7. Аналитический подход при исследовании уравнений импульсов пограничного слоя при течении в межлопаточном канале газовых турбин / А. А. Кишкин, А. А. Зуев, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко // Вестник Моск. авиац. ин-та. 2021. Т. 28, № 1. С. 45–60. DOI: 10.34759/vst-2021-1-45-60.
8. Laptev A. G., Farakhov T. M., Lapteva E. A. Dissipative mathematical model of heat transfer in channels with process intensifiers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. P. 52045. DOI: 10.1088/1757-899X/919/5/052045.
9. Zhuikov D. A., Zuev A. A., Nazarov V. P. Hydraulic losses in the initial section of a flow parts of at aggregates of liquid rocket engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. P. 22034. DOI: 10.1088/1757-899X/862/2/022034.



10. Черненко Д. В. Гидродинамика центробежных лопаточных нагнетателей энергосиловых установок летательных аппаратов : дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2005. 167 с.
11. Chernenko V. V., Chernenko D. V. Flow model in the impeller of a centrifugal pump // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MIP-III 2021). 2021. P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/1155/1/012065.
12. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М. : Энергоиздат, 1985. 320 с.
13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / пер. с нем. Г. А. Вольперта ; под ред. Л. Г. Лойцянского. М. : Наука, 1974. 712 с.
14. Лойцянский Л. Г. Ламинарный пограничный слой. М. : Физматгиз, 1962. 478 с.
15. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1970. 940 с.
16. Лаптев А. Г., Фарахов Т. М. Математические модели и расчет гидродинамических характеристик пограничного слоя // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 08 (82). С. 710–744.
17. Лаптев А. Г. Модели пограничного слоя и расчет тепло-массообменных процессов. Казань : Изд-во Казанск. ун-та, 2007. 500 с.
18. Лаптев А. Г. Башаров М. М., Рунов Д. М. Определение коэффициентов теплоотдачи в каналах с элементами интенсификации // Междунар. журнал приклад. и фундамент. исследований. 2015. № 3. С. 311–316.
19. Лаптева Е. А., Фархатов Т. М. Математические модели и расчет тепло-массообменных характеристик аппаратов / под ред. А. Г. Лаптева. Казань : Отечество, 2013. 182 с.
20. Шкарбуль С. Н. Исследование пространственных течений вязкой жидкости в рабочих колесах центробежных компрессоров : дисс. ... докт. техн. наук. Л., 1973. 398 с.
21. Елин В. И., Солдатов К. Н., Соколовский С. М. Насосы и компрессоры. М. : Гос. науч.-техн. изд-во нефтяной и горно-топливной лит-ры, 1960. 373 с.
22. Овсяников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1986. 376 с.

## References

1. Filin N. A., Mkrtchyan M. K. [Little-known facts of the history of the creation of a turbopump unit in a liquid-propellant rocket engine]. *Vestnik Mosk. aviats. in-ta*. 2021, Vol. 28, No. 13, P. 63–73 (In Russ.).
2. Nazarov V. P., Yatsunenkov V. G., Kolomentsev A. I. [Structural and technological factors of stability of the energy parameters of turbopump units of rocket engines]. *Vestnik Mosk. aviats. in-ta*. 2014, Vol. 21, No. 5, P. 101–105 (In Russ.).
3. Zuev A. A., Arngold A. A., Danilov N. A. [Power balance of centrifugal pumps for power systems of aircraft and spacecraft]. *Reshetnevskiy chteniya*. 2020, P. 132–133 (In Russ.).
4. Nazarov V. P., Chernenko V. V., Chernenko D. V. [Flow model in the impeller of a centrifugal pump]. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 3, P. 494–503 (In Russ.).
5. Zuev A. A., Arngold A. A., Tolstopyatov M. I. Flow with heat transfer in a rotating cavity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Workshop Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019*. 2019. P. 22026. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022026.
6. Korochinsky V. V. *Razrabotka trubchatykh napravlyayushchih apparatov v otvodah vysokooborotnykh centrobezhnykh nasosov s cel'yu snizheniya vibratsii i uvelicheniya resursa raboty. Diss. Kand.* [Development of tubular guide vanes in the outlets of high-speed centrifugal pumps in order to reduce vibration and increase the service life. Diss. Cand.]. Moscow, 119 p.
7. Kishkin A. A., Zuev A. A., Delkov A. V., Shevchenko Y. N. [An analytical approach to the study of boundary layer pulse equations during flow in the interscapular channel of gas turbines]. *Vestnik Mosk. aviats. in-ta*. 2021, Vol. 28, No. 1, P. 45–60 (In Russ.).

8. Laptev A. G., Farakhov T. M., Lapteva E. A. Dissipative mathematical model of heat transfer in channels with process intensifiers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, P. 52045. DOI: 10.1088/1757-899X/919/5/052045.
9. Zhuikov D. A., Zuev A. A., Nazarov V. P. Hydraulic losses in the initial section of a flow parts of at aggregates of liquid rocket engines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, P. 22034. DOI: 10.1088/1757-899X/862/2/022034.
10. Chernenko D. V. *Gidrodinamika centrobezhnyh lopatochnykh nagnetateley energosilovykh ustanovok letatel'nykh apparatov*. Diss. Kand. [Hydrodynamics of centrifugal vane superchargers of power plants of aircraft. Diss. Cand.]. Krasnoyarsk, SibGAU, 167 p.
11. Chernenko V. V., Chernenko D. V. Flow model in the impeller of a centrifugal pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (MIP-III 2021). 2021, Vol. 1155, P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/1155/1/012065.
12. Kutateladze S. S., Leontiev A. I. *Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogranichnom sloye* [Heat and Mass Transfer and Friction in a Turbulent Boundary Layer]. Moscow, Energoizdat Publ., 1985, 320 p.
13. Schlichting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* [Theory of the boundary layer]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 712 p.
14. Loitsyansky L. G. *Laminarnyy pogranichnyy sloy* [Laminar boundary layer]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962, 478 p.
15. Loitsyansky L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 940 p.
16. Laptev A. G., Farahov T. M. [Mathematical models and calculation of hydrodynamic characteristics of the boundary layer]. *Nauchnyy zhurnal KuBGU*. 2012, No. 08 (82). P. 710–744 (In Russ.).
17. Laptev A. G. *Modeli pogranichnogo sloya i raschet teplo-massoobmennyykh processov* [Boundary layer models and calculation of heat and mass transfer processes]. Kazan, 2007, 500 p.
18. Laptev A. G., Basharov M. M., Runov D. M. [Determination of heat transfer coefficients in channels with intensification elements]. *Mezhdunar. zhurnal priklad. i fundamental. issled-iy*. 2015, No. 3, P. 311–316 (In Russ.).
19. Lapteva E. A., Farkhatov T. M. *Matematicheskie modeli i raschet teplo-massoobmennyykh harakteristik apparatov* [Mathematical models and calculation of heat and mass transfer characteristics of apparatuses]. Kazan, Fatherland Publ., 2013, 182 p.
20. Shkarbul S. N. *Issledovanie prostranstvennykh techeniy vyazkoj zhidkosti v rabochih kolesah centrobezhnykh kompressorov*. Dr. Diss. [Investigation of spatial flows of viscous liquid in impellers of centrifugal compressors. Dr. Diss.]. Leningrad, 1973, 398 p.
21. Elin V. I., Soldatov K. N., Sokolovsky S. M. *Nasosy i kompressory* [Pumps and compressors]. Moscow, 1960, 373 p.
22. Ovsyanikov B. V., Borovsky B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Theory and calculation of power units for liquid-propellant rocket engines. 3rd ed., revised. and additional]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 376 p.

© Черненко В. В., Черненко Д. В., Толстопятков М. И., Манохина Э. С., Фалькова Е. В., 2024

---

**Черненко Валентина Викторовна** – старший преподаватель кафедры двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: 2887722@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0007-2111-5316>

**Черненко Дмитрий Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры холодильной криогенной техники; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: g\_ramzes@mail.ru.

**Толстомятов Михаил Игоревич** – кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: 8913039999@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4325-8189>

**Манохина Эльвира Сергеевна** – студент гр. МРД22-01, кафедра двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: xim96@inbox.ru. <https://orcid.org/0009-0007-7269-7248>

**Фалькова Екатерина Владимировна** – старший преподаватель кафедры технической механики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: falkova@sibsau.ru.

**Chernenko Valentina Viktorovna** – Lecturer of Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: 2887722@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0007-2111-5316>

**Chernenko Dmitry Viktorovich** – Cand. Sc., Associate Professor Department of Refrigeration Cryogenic Technology, Institute of Mechanical Engineering and Mechatronics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: g\_ramzes@mail.ru.

**Tolstopiatov Mikhail Igorevich** – Cand. Sc., Associate professor of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: 8913039999@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4325-8189>

**Manokhina Elvira Sergeevna** – student gr. MRD22-01, Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: xim96@inbox.ru. <https://orcid.org/0009-0007-7269-7248>

**Falkova Ekaterina Vladimirovna** – Lecturer of Department of Technical Mechanics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: falkova@sibsau.ru.

---

Статья поступила в редакцию 13.09.2024; принята к публикации 01.10.2024; опубликована 26.12.2024

The article was submitted 13.09.2024; accepted for publication 01.10.2024; published 26.12.2024

A series of horizontal lines of varying thicknesses, stacked on top of each other, extending from the left edge of the page towards the center.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ  
И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL  
PROCESSES  
AND MATERIALS SCIENCE

A series of vertical lines of varying thicknesses, stacked on top of each other, extending from the bottom edge of the page towards the center.

УДК 621.317.444

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-508-520

**Для цитирования:** Мелентьев Д. О., Пискажова Т. В., Донцова Т. В. Методы и проблемы калибровки космических магнитометров на анизотропном магниторезистивном эффекте // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 508–520. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-508-520.

**For citation:** Melent'ev D. O., Piskazhova T. V., Dontsova T. V. [Review of problems and methods of calibration of space magnetometers based on anisotropic magnetoresistive effect]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 508–520. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-508-520.

## Методы и проблемы калибровки космических магнитометров на анизотропном магниторезистивном эффекте

Д. О. Мелентьев<sup>1, 2</sup>, Т. В. Пискажова<sup>2</sup>, Т. В. Донцова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 990041, Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: denes.2000@mail.ru

В космической отрасли широко применяются приборы, измеряющие магнитное поле Земли. Всё чаще в состав систем ориентации и стабилизации низкоорбитальных космических аппаратов (КА) входят магнитометры, изготовленные с применением магниторезистивной технологии. Это обоснованно малым весом, размером и энергопотреблением таких приборов, что делает их идеальными для применения на малогабаритных космических аппаратах. Однако основной проблемой магниторезистивных магнитометров является необходимость оценки возможных ошибок измерений. Влияние ошибок значительно снижает точностные характеристики прибора. С целью решения представленной проблемы исследователи предлагают различные методы оценки и исключения влияния ошибок на измерения [1–7]. Среди способов устранения ошибок в показаниях прибора применяются конструктивные решения, такие как вынесение прибора на расстояние от КА при помощи выдвижной штанги, с целью уменьшения влияния помех на прибор от аппарата [2]. Такое решение целесообразно для крупногабаритных КА, где наличие устройства выдвижения магнитометра не усложнит конструкцию и не увеличит энергопотребление. Для малых КА подобное решение не целесообразно. По этой причине при обсуждении магнитометров малогабаритных КА большое внимание уделяется методам калибровки, математической оценке и устранению ошибок как в наземных, так и в лётных условиях. Целью работы является формирование общего представления о причинах искажений в показаниях анизотропных магниторезистивных магнитометров, способах их математической оценки. Проведён обзор методов и оборудования для проведения наземной калибровки. В работе рассмотрены методики наземной калибровки анизотропных магниторезистивных магнитометров, применяемых на низкоорбитальных космических аппаратах в составе системы ориентации и стабилизации. Дана характеристика калибруемым параметрам магнитометров и предложена математическая модель измерений прибора с учётом ошибок. Описаны основные операции и оборудование, применяемые в процессе калибровки. Результаты работы могут быть полезны при проектировании рабочих мест калибровки магнитометров, а также при проведении эмпирических исследований в области магнитометрических датчиков.

**Ключевые слова:** калибровка магниторезистивного магнитометра, математическая модель измерений магнитометра, методы калибровки магниторезистивного магнитометра.

## Review of problems and methods of calibration of space magnetometers based on anisotropic magnetoresistive effect

D. O. Melent'ev<sup>1,2</sup>, T. V. Piskazhova<sup>2</sup> T. V. Dontsova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"  
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: denes.2000@mail.ru

*Instruments measuring the Earth's magnetic field are widely used in the space industry. Increasingly, low-orbit spacecraft orientation and stabilization systems include magnetometers manufactured using magnetoresistive technology. This is justified by the low weight, size and consumption of such devices, which makes them ideal for use on small-sized spacecraft. However, the main problem of magnetoresistive magnetometers is the need to estimate possible measurement errors. The influence of errors significantly reduces the accuracy characteristics of the device. In order to solve the problem, researchers propose various methods for evaluating and eliminating the influence of errors on measurements [1–7]. Among the ways to eliminate errors in the readings of the device, constructive solutions are used, such as putting the device at a distance from the spacecraft using a retractable boom, in order to reduce the influence of interference on the device from the device [2]. Such a solution is advisable for large spacecraft, where the presence of a retractable boom will not complicate the design and will not increase energy consumption. For small spacecraft, such a solution is not advisable, for this reason, when discussing small-sized spacecraft magnetometers, much attention is paid to calibration methods, mathematical evaluation and error correction, both in ground and in flight conditions. The objectives of the article include the formation of a general understanding of the causes of distortions in the readings of anisotropic magnetoresistive magnetometers, methods of their mathematical evaluation. A review of methods and equipment for ground calibration is carried out. The characteristics of the calibrated parameters of magnetometers are given and a mathematical model of measurement of the device is proposed, taking into account errors. The basic operations and equipment used in the calibration process are described. The results of the work can be useful in designing workplaces for calibrating magnetometers, as well as in conducting empirical research in the field of magnetometric sensors.*

*Keywords: calibration of a magnetoresistive magnetometer, a mathematical model of magnetometer measurements, methods of calibration of a magnetoresistive magnetometer.*

### Введение

Магнитометры широко применяются на космических аппаратах (КА) в системах ориентации и стабилизации (СОС), также они являются ключевым компонентом научных исследований в части изучения Земли и других планет солнечной системы.

В настоящее время в СОС большинства низкоорбитальных КА входят магнитометры, изготовленные с применением анизотропной магниторезистивной технологии (АМР) [1–3], что обосновано малым весом, размером и энергопотреблением такого прибора. В СОС магнитометры применяются с целью определения величины и направления вектора магнитного поля Земли. Полученная информация используется для расчёта управляющих моментов КА, например для стабилизации вращения КА управляющие моменты формируются электромагнитными исполнительными органами (катушками) по показаниям магнитометра.

Однако основной проблемой АМР магнитометров является необходимость оценки возможных ошибок измерений, т. е. необходимость проводить калибровку прибора. С целью решения представленной проблемы исследователи предлагают различные методы оценки и ослабления ошибок, влияющих на измерения [2–7].

Следует упомянуть также о том, что ошибки не разделяются на периодические и постоянные, они объединяются в общей методике калибровки, которая представляется универсальной

для различных типов магнитометров и областей их применения. Основными параметрами, которые подвержены калибровке, являются величина смещения выходной характеристики, коэффициенты наклона выходной характеристики (коэффициенты чувствительности), коэффициенты неортогональности (отклонение осей чувствительности прибора от осей прибора).

В статье будут рассмотрены основные направления в методиках калибровки космических магнитометров и кратко описаны следующие составляющие методик:

- математическая модель с учётом ошибок;
- оборудование;
- операции, проводимые на комплекте оборудования.

### **Ошибки, вызванные магнитомягкими материалами**

Магнитомягкие материалы в составе конструкции прибора формируют собственное магнитное поле под воздействием внешнего. Направление и величина вектора магнитного поля, генерируемого магнитомягкими материалами, может изменяться в широком диапазоне, что во многом зависит от материала, формы элемента и приложенного вектора внешнего магнитного поля. В результате такого воздействия формируется ошибка с зависимостью от внешнего магнитного поля, часто её представляют как матрицу «магнитомягких ошибок» [4]:

$$D_{si} = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xz} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{yz} \\ a_{zx} & a_{zy} & a_{zz} \end{bmatrix}.$$

В некоторых случаях она может быть упрощена путём исключения недиагональных элементов матрицы.

Также следует упомянуть, что коэффициенты матрицы  $D_{si}$  являются линейными только в условиях малой величины внешнего магнитного поля, так как относительная магнитная проницаемость сред  $\mu$ , а следовательно, и коэффициенты, не линейны при средних и больших значениях магнитного поля [4; 8].

### **Коэффициенты преобразования**

У любого АМР датчика по каждой из осей чувствительности имеется свой коэффициент преобразования, обычно это преобразование величины магнитного поля в выходную величину напряжения, таким образом размерность коэффициента преобразования  $k$  [мВ/(В·мТл)], где «мВ» – величина выходного сигнала при напряжении питания  $U_{пит}$  ЧЭ «В» и магнитной индукции «мТл». Выходная величина чувствительного элемента (ЧЭ) может быть усилена и оцифрована. Отразить эти коэффициенты в математической модели можно следующим образом [7]:

$$S = \begin{bmatrix} k_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & k_y^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & k_z^{-1} \end{bmatrix} \cdot U_{пит \text{ ЧЭ}}.$$

Следует также отметить, что на практике при наличии ЧЭ в составе прибора разделить диагональную матрицу  $D_{si}$  и  $S$  не представляется возможным, таким образом калибровочные коэффициенты определяются для их произведения.

### **Смещение**

Смещение можно разделить на три вида, где первое – это технологическое смещение датчика, второе – это смещение выходного сигнала прибора под действием магнитотвёрдых материалов (постоянные магниты при условии отсутствия внешних полей, способных их перемагнитить) и токовых контуров, третье – периодическое воздействие полей, создаваемых КА.

Все перечисленные виды накладываются друг на друга, и, как правило, в процессе калибровки их не разделяют:

$$b = [b_x, b_y, b_x].$$

### Неортогональность

ЧЭ, изготовленные на тонкоплёночных элементах, не отличаются прецизионной точностью расположения осей чувствительности. Откуда возникают ошибки, связанные с неортогональностью осей чувствительности друг к другу, как указано на рис. 1:

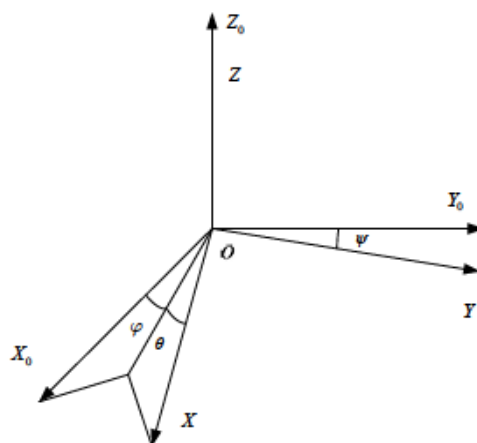


Рис. 1. Схематическая модель неортогональности, где  $X_0, Y_0, Z_0$  — ортогональный базис

Fig. 1. Schematic model of non-orthogonality, where  $X_0, Y_0, Z_0$  is the orthogonal basis

Обычно неортогональность описывается матрицей поворота, например [9]:

$$C_{NO} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi)\cos(\theta) & \sin(\varphi)\cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & \cos(\psi) & \sin(\psi) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

### Несоосность

Помимо неортогональности осей чувствительности прибора, оси, как правило, располагаются не соосно с осями прибора, что также требует некоторой математической корректировки, например при помощи матрицы поворота (углов Эйлера) [10]:

$$C_{NS} = \begin{bmatrix} \cos(\beta)\cos(\gamma) & -\cos(\beta)\sin(\gamma) & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \sin(\gamma)\cos(\alpha) & -\sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\cos(\gamma) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\gamma) - \sin(\beta)\cos(\alpha)\cos(\gamma) & \sin(\alpha)\cos(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix}.$$

Матрица поворота  $C$  будет являться произведением матриц  $C_{NO}$  и  $C_{NS}$ .

### Температурная зависимость

Температурная зависимость АМР датчиков и магнитометров является достаточно серьёзной и вездесущей проблемой, о которой на удивление мало написано. Несмотря на то, что физические свойства чувствительного элемента подразумевают устранение температурного смещения, производственные дефекты пермалловых плёнок и температурная зависимость напряжения питания ЧЭ и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) играют существенную роль в формировании выходных значений прибора.



Обобщённо, температурная зависимость может быть выражена в следующем виде [1]:

$$K_T = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}.$$

### Математическая модель измерений прибора с учётом ошибок

Ранее мы перечислили некоторые ошибки, свойственные для большинства магнитометрических датчиков и магнитометров. Составляя математическую модель, исследователи зачастую отражают в ней все известные эффекты, влияющие на показания прибора (рис. 2).



Рис. 2. Ошибки, влияющие на показания АМР магнитометра

Fig. 2. Errors affecting the AMR magnetometer readings

Процесс калибровки некоторых из перечисленных ошибок весьма ресурсозатратный и не приносит большого выигрыша в точности, по этой причине математическую модель упрощают до состояния, при котором возможно определить все её элементы наименее затратно и с требуемой точностью.

Математическая модель, по нашему мнению, будет выглядеть следующим образом, что отличается от модели, предложенной в работе [1]:

$$B_{\text{дейст}} = (S \cdot C \cdot D_{si} + K_T \cdot T) \cdot U_{\text{маг}} - S \cdot C \cdot D_{si} \cdot (b + K_{Tb} \cdot T),$$

где  $B_{\text{действ}}$  – вектор эталонного магнитного поля (мТл), полученного по показаниям эталонного магнитометра или иным способом;  $T$  – скаляр температуры магнитометра ( $^{\circ}\text{C}$ ) (в случае компоновки ЧЭ и блока электроники в одном корпусе – температура чувствительного элемента);  $K_{Tb}$  – вектор температурных коэффициентов смещения нуля (мВ/ $^{\circ}\text{C}$ );  $U_{\text{маг}}$  – вектор выходного сигнала магнитометра (мВ);  $b$  – выходной сигнал прибора при отсутствии внешнего поля и нормальных условиях (мВ).

Основной задачей процесса калибровки магнитометра является поиск всех составляющих элементов математической модели. Прибор считается откалиброванным, если при подстановке измерений  $B_{\text{маг}}$ , при различных внешних условиях в математическую модель результат её вычисления не отклоняется от показаний эталонного прибора более чем на величину, определяемую требованиями по точности прибора.

### Методики калибровки

Методики калибровки магнитометров можно разделить на две категории:

- зависимые от положения – требуют высокоточных данных об ориентации осей прибора (и КА, в случае лётной калибровки);
- независимые от положения – применяются в условиях отсутствия точной информации о положении осей чувствительности магнитометра относительно эталонного магнитного поля.

Следует отметить, что математические методы, применяемые в обеих категориях, весьма схожи, однако при отсутствии данных о положении параметры матриц  $[S \cdot C \cdot D_{si}]$  не поддаются наблюдению и не могут быть определены [11; 12]. Полностью заполненная матрица с 9 независимыми коэффициентами в условиях космического пространства может быть вычислена только в том случае, если известно положение космического аппарата и расположение осей чувствительности прибора в связанной с КА системе координат [13].

Проводя сравнение наземной и лётной калибровки магнитометров, следует отметить, что многие исследователи считают процесс наземной калибровки весьма сложным [13, 14]. Подобное мнение оправдано необходимостью применения прецизионно точного оборудования и систем, а также места испытаний, защищённого от магнитных помех. Более того, механические воздействия при выведении КА на орбиту могут стать причиной дополнительных ошибок, неучтённых при проведении наземной калибровки. С целью решения указанных проблем на Земле проводится грубая калибровка с последующей корректировкой параметров на орбите.

Однако СОС КА магнитометры также применяются в режиме успокоения аппарата после отделения от ракеты-носителя, что в свою очередь требует быстрого реагирования прибора и не позволяют повысить его точностные характеристики вплоть до перехода в режим трёхосной стабилизации КА. Исходя из описанного, для СОС КА, в которых магнитометр является основным прибором режима успокоения, особенно важно проведение точной наземной калибровки.

### Применяемое оборудование при наземной калибровке

Как было указано ранее, для проведения испытаний необходимо обеспечить отсутствие каких-либо магнитных помех в рабочей области стенда. В первую очередь, для осуществления данной задачи избегают применения каких-либо магнитных материалов и проводников с током в непосредственной близости к испытательному стенду. Желательно также изолировать стенд магнитных испытаний и посадочные места магнитометров от цепей заземления. Для исключения помех техногенного характера установку могут расположить вдали от городов, ЛЭП или под землёй [5].

Отдельно следует упомянуть о применении магнитного экранирования. При необходимости достижения наилучшей стабильности и исключения магнитных вариаций геомагнитного поля (зависит от широты и солнечной активности) [15] испытательный стенд размещают в экранирующей камере, изготовленной из трёх (или более) слоёв материала с высокой магнитной проницаемостью (пермаллой или сталь), разделённого немагнитными слоями. Необходимо заметить, что объём камеры должен быть достаточен для того, чтобы аппаратура, расположенная внутри,

не наводила дополнительных помех посредством взаимодействия переменного поля аппаратуры и материала камеры, также это обосновано эффективной зоной работы магнитного экрана [16].

Следующей важной частью стенда является устройство, позволяющее устанавливать величину и направление вектора магнитной индукции в рабочей области стенда. С этой целью применяются различные соленоиды и постоянные магниты, однако наиболее широко распространено применение системы колец Гельмгольца и её различных модификаций, таких как системы колец Максвелла, Баркера, Браунбека (рис. 3) и Гаррета [17]. Особенностью всех перечисленных систем является высокая степень однородности магнитного поля в рабочей области. Рабочий диапазон и точность колечной системы могут быть настроены в соответствии с требованиями к стенду при помощи подбора числа, диаметра и формы витков катушек, а также программируемого источника питания. Следует отметить, что, применяя трёхосные колечные системы, возникает возможность установки вектора магнитного поля рабочей области в любом желаемом направлении.

Важным инструментом, влияющим на результат калибровки, является источник данных о направлении и величине истинного (эталонного) магнитного поля в рабочей области стенда. Чаще всего данные об эталонном магнитном поле в рабочей области получают с эталонного феррозондового магнитометра [1; 6]. При отсутствии помех техногенного характера, эталонный магнитометр может быть установлен на значительном расстоянии от стенда с целью определения величины и направления геомагнитного поля. В подобной компоновке эталонный магнитометр не будет влиять на магнитное поле рабочей области стенда, а данные о магнитном поле рабочей области будут определены математически, исходя из характеристик системы колец стенда и токов в их обмотках. Калибровка может быть проведена только с применением системы колец, однако в таком случае будут отсутствовать точные данные о геомагнитном поле Земли (начальном поле при отсутствии тока в колечной системе), что приведёт к дополнительным погрешностям во время калибровки. Следует напомнить, что некоторые методы предусматривают отсутствие точных данных о величине и направлении магнитного поля [5; 6; 11], таким образом, для проведения калибровки достаточно знать модуль вектора магнитной индукции в месте проведения испытаний, например, используя данные модели Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии (МАГА или *IAGA*).

Ещё одним устройством, применяемым в ряде методик, является поворотный стол. Обычно он применяется при отсутствии трёхосной колечной системы [18] или в качестве дополнительного оборудования для неё [6].

При необходимости проведения температурной калибровки, для проверок в области отрицательных и положительных температур, возможно применение климатической камеры. Камера изготавливается из немагнитного непроводящего материала (рис. 3) [6] (при объёме значительно большем объёма колечной системы может быть изготовлена из проводника). В случае, когда точно известен характер температурной зависимости прибора, то достаточно применения нагревательного элемента [1].

### **Проводимые операции**

Целью проведения калибровки является определение всех коэффициентов рассматриваемой математической модели. Модель определяется исходя из требований к прибору, доступного оборудования и ресурсов. Перечень проводимых операций над магнитометром определяется нахождением составляющих модели.

### **Нулевое или технологическое смещение прибора «b» при нормальных условиях**

1. При использовании трёхосной колечной системы проводится компенсация геомагнитного поля Земли и постоянных наводок от контуров с током и магнитов путём подачи рассчитанной величины тока в систему колец. При выполнении указанной операции используются данные эталонного магнитометра или расчётные данные. Применение расчётных данных влечёт некоторую погрешность, поскольку они не предусматривают суточных вариаций магнитного поля Земли и влияния техногенного фактора.



Рис. 3. Пример внешнего вида стенда магнитных испытаний [6], где применяется система колец Браунбека, испытуемый и эталонный магнитометры расположены на поворотном столе в термокамере (жёлтый ящик), термокамера устанавливается в центр кольцевой системы при помощи каретки

Fig. 3. An example of the appearance of a magnetic test stand [6], where the Brownback ring system is used, the test and reference magnetometers are located on a turntable in a thermal chamber (yellow box), the thermal chamber is installed in the center of the ring system using a carriage

2. При использовании одноосной кольцевой системы совместно с эталонным магнитометром компенсация проводится только вдоль одной оси.

3. При отсутствии кольцевой системы, наличии эталонного магнитометра и поворотного стола, ось стола выставляют перпендикулярно магнитному меридиану (эталонный магнитометр покажет отсутствие магнитной индукции вдоль определённого направления).

4. При отсутствии оборудования магнитометр выставляют одной осью вдоль магнитного меридиана (прибор покажет максимальное или минимальное значение).

Выполняя указанные операции, возможно определить технологическое смещение прибора (показания прибора при отсутствии внешнего поля). Следует отметить, что некоторые магнитометры (как правило, космические) не способны работать в условиях магнитного поля Земли (60 мкТл), поскольку их диапазон измерений значительно меньше и варьируется от области применения прибора, например в миссии *TRIO-CINEMA* применялся AMP магнитометр с рабочим диапазоном  $\pm 50$  мкТл, а в *Europa Clipper mission* – феррозондовый магнитометр с рабочим диапазоном  $\pm 4$  мкТл, по этой причине без проведения компенсации поля по трём осям проводить наземную калибровку некоторых космических магнитометров не представляется возможным.

#### **Определение углов отклонения осей чувствительности от осей прибора « $C \cdot D_{Si}$ » при нормальных условиях**

На данном этапе осуществляется вращение вектора магнитной индукции в плоскости каждой из трёх осей. В случае невозможности вращения вектора вращается прибор. При отсутствии точных данных о положении вектора эталонного поля, точно определить углы отклонения осей чувствительности не представляется возможным.

#### **Определение коэффициентов наклона характеристики « $S \cdot C \cdot D_{Si}$ » и линейности**

На данном этапе магнитное поле поочерёдно прикладывается вдоль осей чувствительности прибора, строится выходная характеристика (градуировочная характеристика) для каждой

из осей по данным прибора при разной величине поля. Зная выходные характеристики по каждой из осей чувствительности при известном магнитном поле, определяется нелинейность выходной характеристики (Гистерезис).

Следует отметить, что возможно объединить операции по определению углов отклонения, коэффициентов наклона и линеарности, прикладывая поле вдоль оси прибора, последующая обработка измерений позволит определить матрицу  $[S \cdot C \cdot D_{si}]$  и величину нелинейности, однако, вследствие анизотропии магнитомягких материалов корпуса прибора, матрица  $[S \cdot C \cdot D_{si}]$  будет определена с некоторой погрешностью.

### Определение матрицы $[S \cdot C \cdot D_{si}]$

Методы, не предусматривающие наличие точной информации о положении (при отсутствии эталонного магнитометра), полагаются исключительно на калибровку при помощи «сферического» вращения прибора в однородном магнитном поле [4; 9; 13], предполагая, что величина вектора магнитной индукции постоянна (рис. 4).

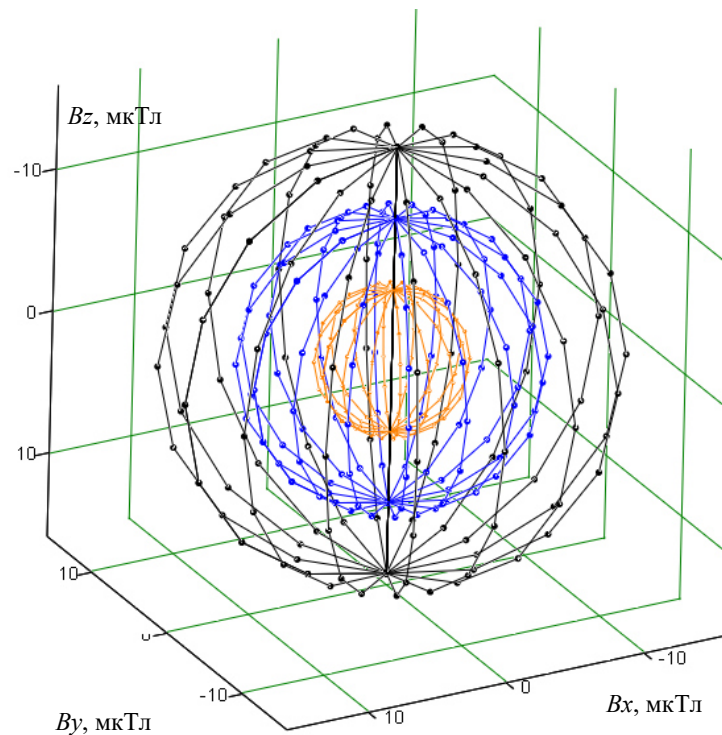


Рис. 4. Модели вращения вектора магнитного поля при шаге углов поворота  $\theta_j = 22,5^\circ$ ,  $\varphi_i = 22,5^\circ$  (углы азимута и высоты) и различной величине модуля вектора магнитного поля:  $B = 15$  мкТл (чёрный),  $B_2 = 10$  мкТл (синий),  $B_3 = 5$  мкТл (оранжевый)

Fig. 4. Models of rotation of the magnetic field vector at a step of rotation angles  $\theta_j = 22,5^\circ$ ,  $\varphi_i = 22,5^\circ$  (azimuth and elevation angles) and different magnitudes of the magnetic field vector modulus:  $B = 15 \mu\text{T}$  (black),  $B_2 = 10 \mu\text{T}$  (blue),  $B_3 = 5 \mu\text{T}$  (orange)

При недоступности данных об эталонном поле, на данном этапе также применяют датчики скорости углового вращения [19; 20] прибора в постоянном магнитном поле. Применение трёх-осной колесной системы позволит также определить величину гистерезиса выходных характеристик и градуировочную характеристику по каждой из осей чувствительности.

### Определение температурных коэффициентов $K_{Tb}$ и $K_T$

На данном этапе проводится нагрев и охлаждение прибора с целью выявления температурной зависимости на коэффициенты  $S \cdot C \cdot D_{si}$ . В целях лабораторных исследований работа ведется

как в положительном, так и в отрицательном диапазоне температур, проводятся операции, описанные ранее. Следует отметить, что, в зависимости от принятой методики испытаний, повторение операций, описанных выше, может не проводиться или проводиться не в полной мере. В целях экономии времени, при известном характере температурной зависимости достаточно провести измерение технологического смещения и определить коэффициенты наклона выходной характеристики при положительных температурах.

Порядок калибровки с включением всех ранее рассмотренных этапов представлен на рис. 5.

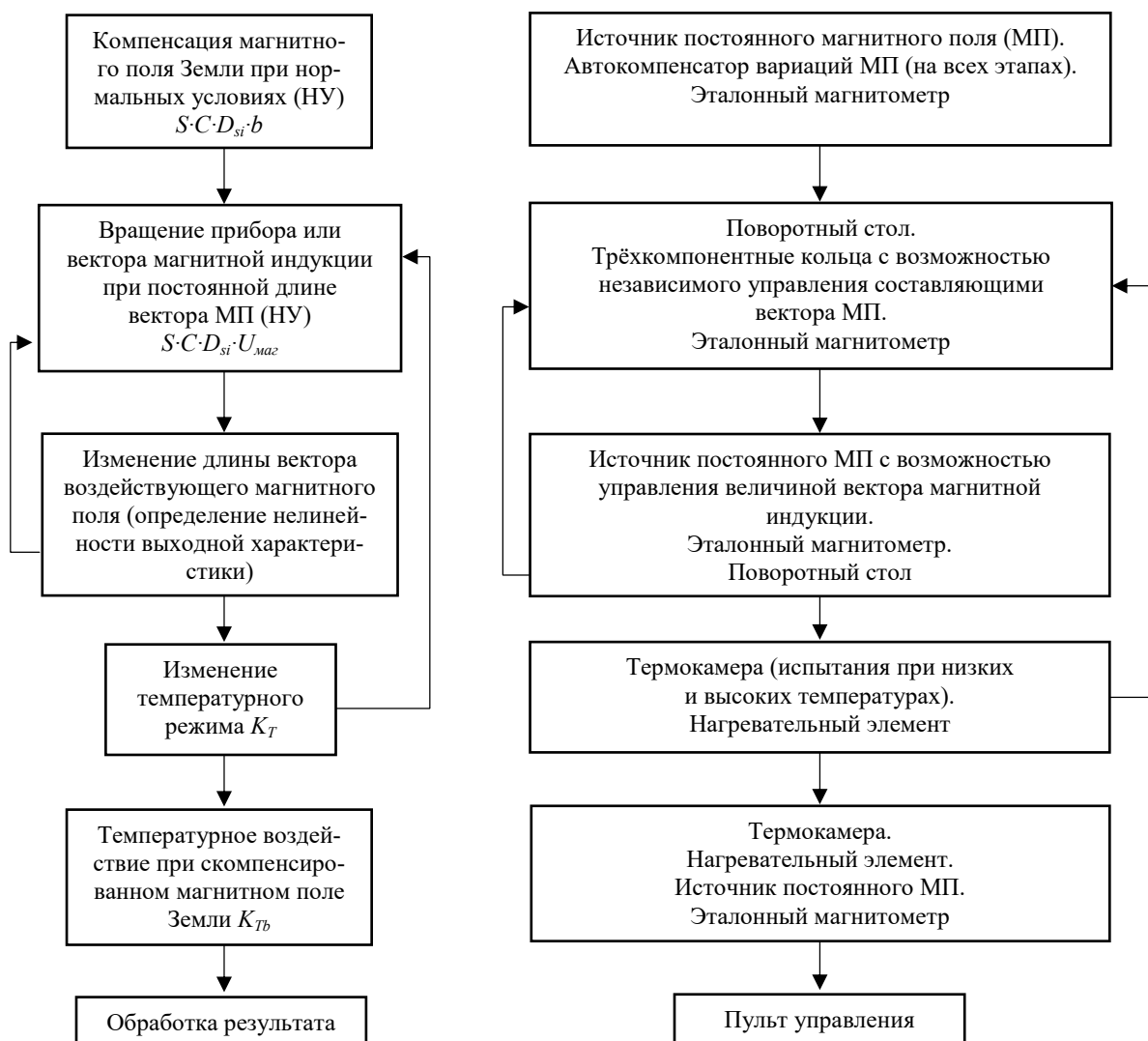


Рис. 5. Образец структурной схемы порядка калибровки (слева) и применяемого на этапах на соответствующих этапах оборудования (справа)

Fig. 5. A sample of the block diagram of the calibration procedure (left) and the equipment used at the stages at the corresponding stages (right)

### Заключение

В представленной работе были рассмотрены методы проведения калибровки магнитометров на анизотропном магниторезистивном эффекте. Определены требования к оборудованию и месту проведения испытаний. Перечислены ошибки, влияющие на показания АМР магнитометра и пример их математического моделирования.

При этом методику определяет математическая модель на основе требований к прибору, также большое значение при выборе методики придаётся времени, затрачиваемому на проведение калибровки, и возможностям применяемого оборудования.

Основной задачей любой методики является обеспечение поиска коэффициентов, определённых математической моделью. С этой целью подбирается и дорабатывается оборудование, производится выбор и подготовка места испытаний, иначе – корректируется математическая модель.

Причиной необходимости применения сложных и дорогостоящих испытательных стендов для калибровок космических магнитометров на АМР эффекте является неповторяемость свойств магнитометров (например, направления осей чувствительности), невозможность их физической подстройки и в случае совместного расположения чувствительного элемента и блока электроники (на одной плате) значительное влияние магнитомягких материалов [2].

В связи с указанными причинами разрабатываются новые методы и математические модели, позволяющие при наименьших затратах по времени и при помощи наименее дешёвого оборудования обеспечить требуемые от прибора характеристики.

### Библиографические ссылки

1. Nicholas B. Verification and calibration of a commercial anisotropic magnetoresistive magnetometer by multivariate non-linear regression / B. Nicholas, K. Mary, M. Rebecca, P. Cadence, A. Kristen, D.L. Frank, C. Kerri // *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 2023. Vol. 12, P. 201–213, URL: <https://doi.org/10.5194/gi-12-201-2023> (дата обращения: 25.04.2024).
2. Brown P. Space magnetometer based on an anisotropic magnetoresistive hybrid sensor / P. Brown, B. J. Whiteside, T. J. Beek, P. Fox, T. S. Horbury, T. M. Oddy, M. O. Archer, J. P. Eastwood, D. Sanz-Hernández, J.G. Sample, E. Cupido, H. O'Brien, C.M. Carr // *The Review of scientific instruments.* 2014. Vol. 85 Iss. 12. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4904702> (дата обращения: 05.06.2024).
3. Ritzinger P. Anisotropic magnetoresistance: materials, models and applications / P. Ritzinger, K. Výborný // *Royal society open science.* 2023. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.1098/rsos.230564> (дата обращения: 11.05.2024).
4. Soken H. E. A Survey of Calibration Algorithms for Small Satellite Magnetometers / H. E. Soken // *Measurement.* 2017. Vol. 122, P. 417–423, doi: 10.1016/j.measurement.2017.10.017.
5. Graven P. Laboratory (and on-orbit) magnetometer calibration without coil facilities or orientation information / P. Graven, T. Kenny // *Engineering, Physics.* 1996.
6. Schulz L. Calibration of Off-the-Shelf Anisotropic Magnetoresistance Magnetometers / L. Schulz, P. Heinisch, I. Richter // *Sensors.* 2019. Vol. 19. Doi: 10.3390/s19081850.
7. Renaudin V. Complete triaxis magnetometer calibration in the magnetic domain / V. Renaudin, M. H. Afzal, G. Lachapell // *Journal of Sensors.* 2010. Vol. 2010 doi; 10.1155/2010/967245;
8. Боярченков М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники : учебное пособие для специальности «Автоматика и телемеханика» вузов / М. А. Боярченков, А. Г. Черкашина. Москва : «Высшая школа», 1976. 383 с.
9. Cheng C. Calibration of triaxial magnetometer with ellipsoid fitting method / C. Cheng, J. W. Lv, D. Wang // *Earth and Environmental Science.* 2019. Vol. 237. Doi: 10.1088/1755-1315/237/3/032015.
10. Буданов А. С. Использование углов Эйлера в инерциальных навигационных системах / А. С. Буданов, В. А. Егунов // *Инженерный вестник Дона.* 2021. № 7. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n7y2021/7072> (дата обращения 12.03.2024).
11. Alonso R. Complete Linear Attitude- Independent Magnetometer Calibration / R. Alonso, M. D. Shuster // *The Journal of the Astronautical Sciences.* 2002. Vol. 50, № 5, P. 477–490.
12. Riwanto B. A. Particle Swarm Optimization With Rotation Axis Fitting for Magnetometer Calibration / B. A. Riwanto, T. Tikka, A. Kestila, J. Praks // *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems.* 2017. Vol. 53. № 2. Doi: 10.1109/TAES.2017.2667458.
13. Riwanto B. A. Particle swarm optimization with rotation axis fitting for magnetometer calibration / B. A. Riwanto, T. Tikka, A. Kestila, J. Praks // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* 2017. Vol. 53, № 2, P.1009–1022. Doi: 10.1109/TAES.2021.3122514.

14. Chingiz H. In-orbit magnetometer calibration based on linear Kalman filtering / XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry". Prague, Czech Republic 2015.
15. Demet C. G. Geomagnetic Disturbance Effects on Satellite Attitude Estimation / C. G. Demet, K. Zerefsan, H. Chingiz // *Acta Astronautica*. 2021. Vol. 180. P. 701–712. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.12.044> (дата обращения: 16.07.2024).
16. Батищев А. Г. Фотоэлектронные умножители с многослойными плёночными экранами / А. Г. Батищев, К. Ф. Власик, С. С. Грабчиков, В. М. Грачев, В. В. Дмитренко, Н. П. Калашников, С. С. Муравьев-Смирнов, П. В. Ньюнт, С. Е. Улин, З. М. Утешев, А. В. Челедюк // *Приборы и методы измерений*. 2012. № 1. С. 16–23.
17. Клевец Н. И. Синтез простейших систем, создающих однородное магнитное поле / Вестник Физико-технического института Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. 2017. №4. С. 47–62.
18. Акимов И. О. Методика калибровки магнитометра на этапе наземной диагностики систем космического аппарата / И. О. Акимов, С. Н. Илюхин, Н. А. Ивлев, Г. Е. Колосов // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018. № 5. Doi: 10.18698/2308-6033-2018-5-1762.
19. Soken H. E. Attitude Estimation and Magnetometer Calibration Using Reconfigurable TRIAD+Filtering Approach / H. E. Soken, Shin-ichiro Sakai // *Aerospace Science and Technology*. 2020. Vol. 99 doi: 10.1016/j.ast.2020.105754.
20. Василюк Н. Н. Рекуррентная реализация алгоритма калибровки интегрального магнитометра с использованием измерений трехосного гироскопа / Н. Н. Василюк // *Гироскопия и навигация*. 2019. Том 27. № 3. С. 87–102, doi: 10.17285/0869-7035.0002.

## References

1. Nicholas B., Mary K., Rebecca M., Cadence P., Kristen A., Frank D.L., Kerri C.. Verification and calibration of a commercial anisotropic magnetoresistive magnetometer by multivariate non-linear regression. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 2023, Vol. 12, P. 201–213. Available at: <https://doi.org/10.5194/gi-12-201-2023> (accessed: 25.04.2024).
2. Brown P., Whiteside B. J., Beek T. J., Fox P., Horbury T. S., Oddy T. M., Archer M. O., Eastwood J. P., Sanz-Hernández D., Sample J. G., Cupido E., O'Brien H., Carr C. M. Space magnetometer based on an anisotropic magnetoresistive hybrid sensor. *The Review of scientific instruments*. 2014, Vol. 85 Iss. 12. Available at: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4904702> (accessed: 05.06.2024).
3. Ritzinger P., Výborný K. Anisotropic magnetoresistance: materials, models and applications. *Royal society open science*. 2023. Vol. 10. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsos.230564> (accessed: 11.05.2024).
4. Soken H. E. A Survey of Calibration Algorithms for Small Satellite Magnetometers *Measurement*. 2017., Vol. 122, P. 417–423, doi: 10.1016/j.measurement.2017.10.017.
5. Graven P., Kenny T. Laboratory (and on-orbit) magnetometer calibration without coil facilities or orientation information. *Engineering, Physics*. 1996.
6. Schulz L., Heinisch P., Richter I. Calibration of Off-the-Shelf Anisotropic Magnetoresistance Magnetometers. *Sensors*. 2019. Vol. 19, doi: 10.3390/s19081850.
7. Renaudin V., Afzal M. H., Lachapell G. Complete triaxis magnetometer calibration in the magnetic domain. *Journal of Sensors*. 2010. Vol. 2010 doi: 10.1155/2010/967245.
8. Boyarchenkov M. A., Cherkashina A. G. [Magnetic elements of automation and computer technology]. Moscow, *Vyshshaya shkola*, 1976. 383 p.
9. Cheng C., Lv J. W., Wang D. Calibration of triaxial magnetometer with ellipsoid fitting method. *Earth and Environmental Science*. 2019, Vol. 237, doi: 10.1088/1755-1315/237/3/032015.
10. Budanov A. S., Egunov V. A. [Using Euler angles in inertial navigation systems]. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2021, № 7 (In Russ.), Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7072> (accessed: 12.03.2024).
11. Alonso R., Shuster M. D. Complete Linear Attitude – Independent Magnetometer Calibration. *The Journal of the Astronautical Sciences*. 2002, Vol. 50, № 5, P. 477–490.



12. Riwanto B. A., Tikka T., Kestila A., Praks J. Particle Swarm Optimization With Rotation Axis Fitting for Magnetometer Calibration. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*. 2017. Vol. 53. № 2, doi: 10.1109/TAES.2017.2667458.
13. Riwanto B. A., Tikka T., Kestila A., Praks J. Particle swarm optimization with rotation axis fitting for magnetometer calibration. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2017, Vol. 53, № 2, P.1009–1022, ;doi: 10.1109/TAES.2021.3122514.
14. Chingiz H. In-orbit magnetometer calibration based on linear Kalman filtering. *XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”*. Prague, Czech Republic 2015;
15. Demet C. G. Zerefsan K., Chingiz H. Geomagnetic Disturbance EffectsonSatellite Attitude Estimation. *Acta Astronautica*. 2021. Vol. 180. P. 701–712, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.12.044> (accessed: 16.07.2024).
16. Batishchev A. G., Vlasik K. F., Grabchikov C. C., Grachev V. M., Dmitrenko V. V., Kalashnikov N. P., Murav'ev-Smirnov C. C., N'yunt P. V., Ulin, Z. M. Uteshev C. E., Cheledyuk A. V. [Photoelectronic multipliers with multilayer film screens]. *Pribory I metody izmerenii*. 2012. № 1. P. 16–23 (In Russ.).
17. Klevets N. I. [Synthesis of the simolest systems that create a homogeneous magnetic field] *Vestnik fiziko-tekhnicheskogo instituta Krymskogo Federal'nogo universiteta imeni V. I Vernadskogo*. 2017, № 4. P. 47–62 (In Russ.).
18. Akimov I. O., Ilykhin S. N., Ivlev N. A., Kolosov G. E. [The mode of calibration of the magnetometer at the stage of ground diagnostics of spacecraft systems]. *Inzhenernyi zhurnal nauka i innovatsii*. 2018. № 5 (In Russ.), doi: 10.18698/2308-6033-2018-5-1762.
19. Soken H. E., Shin-ichiro Sakai. Attitude Estimation and Magnetometer Calibration Using Reconfigurable TRIAD+Filtering Approach *Aerospace Science and Technology*. 2020. Vol. 99. Doi: 10.1016/j.ast.2020.105754.
20. Vasilyuk N. N. [Recurrent implementation of the integrated magnetometer calibration algorithm using three-axis gyroscope measurements]. *Giroskopiya i navigatsiya*. 2019, Tom 27, № 3. P. 87–102 (In Russ.). Doi: 10.17285/0869-7035.0002.

© Мелентьев Д. О., Пискажова Т. В., Донцова Т. В., 2024

---

**Мелентьев Денис Олегович** – аспирант, Сибирский федеральный университет; инженер, АО «РЕШЕТНЁВ». E-mail: [denes.2000@mail.ru](mailto:denes.2000@mail.ru). <https://orcid.org/0009-0009-6187-4098>

**Пискажова Татьяна Валериевна** – доктор технических наук, доцент, профессор института цветных металлов; Сибирский федеральный университет. E-mail: [tpiskazhova@sfu-kras.ru](mailto:tpiskazhova@sfu-kras.ru).

**Донцова Татьяна Валентиновна** – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой автоматизации производственных процессов в металлургии института цветных металлов; Сибирский федеральный университет. E-mail: [TDontsova@sfu-kras.ru](mailto:TDontsova@sfu-kras.ru).

**Melent'ev Denis Olegovich** – postgraduate student, Siberian Federal University; engineer; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: [denes.2000@mail.ru](mailto:denes.2000@mail.ru). <https://orcid.org/0009-0009-6187-4098>

**Piskazhova Tat'jana Valer'evna** – Dr. Sc., Associate Professor, Professor Institute of Non-Ferrous Metals; Siberian Federal University. E-mail: [tpiskazhova@sfu-kras.ru](mailto:tpiskazhova@sfu-kras.ru).

**Doncova Tat'jana Valentinovna** – Cand. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Automation of Production Processes in Metallurgy; Institute of Non-Ferrous Metals; Siberian Federal University. E-mail: [TDontsova@sfu-kras.ru](mailto:TDontsova@sfu-kras.ru).

---

Статья поступила в редакцию 27.09.2024; принята к публикации 18.11.2024; опубликована 26.12.2024

The article was submitted 27.09.2024; accepted for publication 18.11.2024; published 26.12.2024

УДК 620.3

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-521-530

**Для цитирования:** Применение высокоскоростной гидродинамической технологии для получения графеновых наносупензий из природных графитов / О. П. Стебелева, Л. В. Кашкина, О. А. Вшивкова, А. В. Минаков // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 521–530. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-521-530.

**For citation:** Stebeleva O. P., Kashkina L. V., Vshivkova O. A., Minakov A. V. [Application of high-speed hydrodynamic technology for the production of graphene nanosuspensions from natural graphites]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 521–530. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-521-530.

## Применение высокоскоростной гидродинамической технологии для получения графеновых наносупензий из природных графитов

О. П. Стебелева<sup>1</sup>, Л. В. Кашкина<sup>1</sup>, О. А. Вшивкова<sup>2</sup>, А. В. Минаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 990041, Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр

Сибирского отделения Российской академии наук»

Российская Федерация, 990036, Красноярск, Академгородок, 50

E-mail: opstebeleva@mail.ru

Углеродные наноструктуры находятся в центре внимания мировой науки более 25 лет, с момента открытия фуллеренов в 1985 г., одностенных углеродных нанотрубок в 1993 г., графена в 2004 г., графеновых квантовых точек в 2004 г. Графен стабилен в условиях окружающей среды и обладает отличными электронными, механическими, химическими, тепловыми и оптическими свойствами. Во всем мире активно проводятся исследования и разработки новых методов применения графена в различных областях, таких как энергетика, нефтедобыча, материаловедение, электроника и т. д. В настоящее время использование графеносодержащих материалов в качестве модификаторов для создания прочных и легких материалов в авиации, автомобилестроении и других отраслях инженерии являются актуальной проблемой. Введение графеновых частиц в состав композиционных материалов целесообразно осуществлять, используя их устойчивые дисперсии в жидкой среде. Получение коллоидных графеновых суспензий во многих случаях эффективно, используя метод жидкофазной эксфолиации графита.

В работе представлены результаты изучения физико-химических свойств водных графеновых суспензий, полученных методом жидкофазной эксфолиации природных графитов высокоскоростной гидродинамической технологии. Графиты марок ГК-1 и ГАК-2 (ГрафитСервис, Челябинск, РФ) – это кристаллические графиты, полученные с помощью обогащения графитовых руд и совместном обогащении природных графитовых руд и графитосодержащих отходов металлургических производств соответственно. Графитовые суспензии были приготовлены на дистиллированной воде с 1 масс. % графита, к некоторым образцам было добавлено поверхностно-активное вещество (ПАВ), время обработки 3–120 мин, скорость вращения ротора 4 000–11 000 об/мин. Полученные графеновые суспензии были исследованы методами РФА, электронной микроскопией и седиментационного анализа на электроакустическом спектрометре DT-1202. Наличие многослойного графена подтверждено сопоставлением результатов РФА с литературными данными. Наряду с многослойным графеном обнаружено присутствие графеновых точек. Получены водные графеновые суспензии для графитов с различным временем седиментации. Для графита ГАК-2 – шесть суток, для графита ГК-1 – 90 суток, для графита ГК-1 + ПАВ – 6 месяцев.

**Ключевые слова:** графен, жидкофазная эксфолиация, гидродинамическая обработка.

## Application of high-speed hydrodynamic technology for the production of graphene nanosuspensions from natural graphites

O. P. Stebeleva<sup>1</sup>, L. V. Kashkina<sup>1</sup>, O. A. Vshivkova<sup>2</sup>, A. V. Minakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences"

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 6600361, Russian Federation

E-mail: opstebeleva@mail.ru

*Carbon nanostructures have been in the focus of world science for more than 25 years, since the discovery of fullerenes in 1985, single-walled carbon nanotubes in 1993, graphene in 2004, graphene quantum dots in 2004. Graphene is a monocrystalline graphite films (2D material) with a thickness of several atoms that are stable under environmental conditions and they have excellent electronic, mechanical, chemical, thermal and optical properties. All over the world, research and development of new methods of using graphene in various fields such as energy, oil production, materials science, and electronics are actively carried out. Currently, the use of graphene-containing materials as modifiers for the creation of durable and effortless materials in aviation, automotive and other branches of engineering is an urgent problem. It is advisable to introduce graphene particles into the composition of composite materials using their stable dispersions in a liquid medium. The production of colloidal graphene suspensions is effective in many cases using the method of liquid phase exfoliation of graphite.*

*The paper presents the results of studying the physico-chemical properties of aqueous graphene suspensions obtained by liquid-phase exfoliation of natural graphites using high-speed hydrodynamic technology. Graphite grades GK-1 and GAK-2 (Grafitservice, Chelyabinsk, Russia) are crystalline graphites obtained by enrichment of graphite ores and joint enrichment of natural graphite ores and graphite-containing waste from metallurgical industries, respectively. Graphite suspensions were prepared in distilled water with 1 wt.% graphite, surfactant was added to some samples, processing time (3–120 min), rotor rotation speed (4 000–11 000 rpm). The resulting graphene suspensions were investigated by XRD, by electron microscopy and sedimentation analysis methods. The particle size was determined using the DT-1202 electroacoustic spectrometer. The presence of multilayer graphene is confirmed by comparing the results of XRD with the literature data. Along with multilayer graphene, the presence of graphene dots was detected. Aqueous graphene suspensions for graphites with different sedimentation times have been obtained. For graphite GAK-2 – six days, for graphite GK-1 – 90 days, for graphite GK-1 + surfactant – 6 months.*

*Keywords: graphene, liquid phase exfoliation, hydrodynamic treatment.*

### Введение

Двумерные (2D) материалы привлекли внимание в 2004 г., когда было продемонстрировано, что один слой атомов углерода – графен может быть стабильно изолирован от графита [1]. В 2017 г. Международная организация по стандартизации (ISO) установила номенклатуру графена как монокристалла одного слоя, состоящего из атомов углерода, организованных в гексагональную форму решетки (симметрия решетки  $p3m1$ , группа точек  $D_3$ ):

- графен: одиночный слой атомов углерода;
- двухслойный графен: два четко определенных слоя графена;
- многослойный графен: состоящий из трех – десяти четко определенных слоев графена;
- графеновые нанопластинки: толщина от 1 до 3 нм и боковые размеры от  $\approx 100$  нм до 100 мкм [2].

Графен привлекает исследователей из различных научных областей из-за уникальных физических, химических, электрических и оптических свойств. Графен состоит из атомов углерода,

связанных вместе в сотовой структуре и находящихся в состоянии  $sp^2$ -гибридизации. Лист графена имеет атомную толщину, впервые синтезирован путем механического жидкофазного расслоения графита в работе [3]. Синтез графена происходит с помощью двух основных подходов: «снизу вверх» – химическое осаждение из паровой фазы [4], молекулярная эпитаксия [5] и т. д. и «сверху вниз» – механическое расслоение графита [6–8]. Методы расслоения графита до графена страдали от главного недостатка – отсутствия масштабируемости [9]. Прогресс от лабораторных до реальных коммерческих приложений потребовал экономически эффективных методов получения графена.

Высокосдвиговое расслоение стало вероятным кандидатом для решения проблемы масштабируемости. В своей основополагающей работе Патон и др. [10] показали, что, используя высокий сдвиг (гидродинамическая технология), можно получать высококачественный графен в больших количествах. Было показано, что расслоение происходит, когда локальные скорости сдвига превышают  $10^4 \text{ с}^{-1}$ , а скорость производства графена составляет  $1,44 \text{ г ч}^{-1}$ , что является высоким значением по сравнению с другими методами, основанными на ультразвуковой обработке. Поскольку метод смешивания с высоким сдвигом широко доступен, авторы утверждают, что их гидродинамическая технология сдвигового расслоения графена может быть легко перенесена в промышленные процессы, тем самым делая бездефектный графен широкодоступным для различных применений.

Разработка и оптимизация процессов получения графеновых суспензий через высокие скорости сдвига (жидкофазную эксфолиацию (ЖЭ)) [11] требуют комплексного подхода, включающего исследование природных ресурсов, разработку технологий и оборудования, а также учет экологических и экономических аспектов. Это направление исследований имеет большой потенциал для инноваций в различных отраслях промышленности. Метод ЖЭ включает расщепление графита на отдельные слои графена с помощью механического воздействия в присутствии подходящего растворителя [12]. Это позволяет получить коллоидные суспензии графена, которые могут быть затем использованы для различных применений. Метод прост в реализации, масштабируем и может обеспечить высокое качество получаемого графена. Он также позволяет контролировать размер и количество слоев графена.

Необходимо искать источники высококачественного графита, который имеет минимальные примеси и высокую кристалличность, что важно для эффективной эксфолиации. Для этой технологии требуется специализированное оборудование, включая гидродинамические генераторы (миксеры), центрифуги для отделения нано- и микрочастиц, а также системы для контроля качества продукта. Важно использовать растворители, которые не наносят вред окружающей среде. Также необходимо разработать методы утилизации отходов производства и минимизации их количества. Оптимальные условия для эксфолиации должны быть найдены с учетом минимизации затрат на энергию, растворители и время процесса. Рассматривается возможность повторного использования растворителей и других материалов.

Целью данной работы было получение графеновых суспензий методом ЖЭ в высокоскоростном миксере и исследование их свойств.

### Образцы и методика эксперимента

В качестве исходного материала были выбраны 2 образца графита: графит марки ГК-1 и ГАК-2. Графит ГК-1 предназначен для производства карандашных стержней, его характеристики регламентирует ГОСТ 4404-78. ГК-1 – кристаллический графит, полученный с помощью обогащения графитовых руд. Кристаллическая структура – слоистая. Графит имеет чёрный цвет с серым оттенком. Графит марки ГАК-2 предназначен для производства электродов для аккумуляторов, его характеристики регламентирует ГОСТ 10273-79. ГАК-2 – кристаллический графит, полученный при раздельном или совместном обогащении природных графитовых руд и графитосодержащих отходов металлургических производств. Кристаллическая структура – слоистая. Графит имеет серый цвет с характерным металлическим блеском (табл.1). В некоторые образцы добавлено поверхностно-активное вещество (ПАВ) – поливинилпирролидол (ПВП).

В качестве дисперсионной среды использовалась дистиллированная вода, регламентируемая ГОСТом Р 58144-2018: «Дистиллированная вода. Технические условия».

Таблица 1

## Характеристики графита

| Параметр                        | Графит ГК-1                                | Графит ГАК-2                    |
|---------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|
| Зольность, %, не более          | 1,0                                        | 0,5                             |
| Массовая доля влаги, % не более | 0,5                                        | 1                               |
| Содержания примеси %, не более  | Выход летучих веществ 0,5<br>Мышьяк 0,0025 | Ионы хлора 0,1<br>Железо 0,5 %. |

Конструкционные особенности миксеров ИКА Т25 (Германия) и JRJ300D-1 (Китай) представлены на рис. 1, технические характеристики приведены в табл. 2. Принцип работы миксеров можно описать следующим образом. Обрабатываемая жидкость поступает в рабочую зону диспергатора снизу через отверстия. Лопатки ротора приводят жидкость в быстрое движение. Жидкость выходит из отверстий с высокой скоростью, создавая интенсивные потоки, которые оказывают воздействие на жидкость.

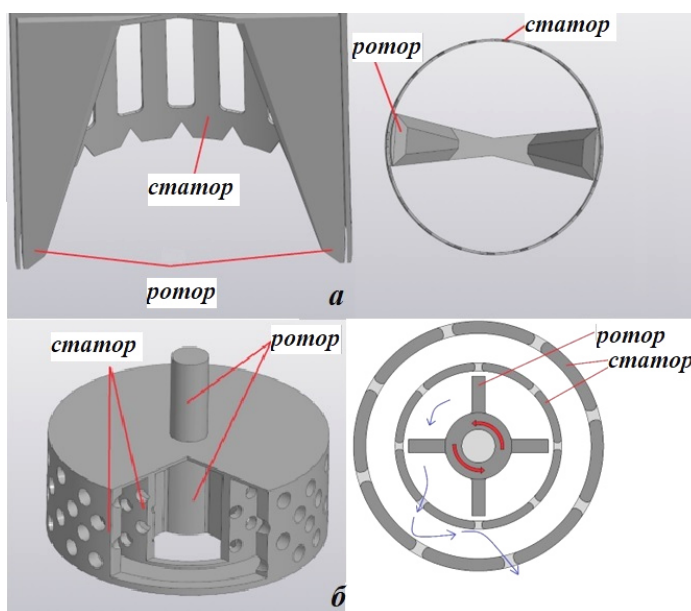


Рис. 1. Конструкция ротор-статор в миксере ИКА Т25 (а) и JRJ300D-1 (б)

Fig. 1. Rotor-stator design in the mixer I KAT 25 (a) and JRJ300D-1 (b)

Таблица 2

## Технические характеристики миксеров

| Параметр                        | Миксер ИКА Т-25 | Миксер JRJ300D-1              |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Выходная мощность двигателя, Вт | 400             | 300                           |
| Диапазон вращения, об/мин       | 3000–25000      | 200–11000                     |
| Рабочий объём, мл               | 1–2000          | 500–40000                     |
| Диаметр ротора, мм              | 13,4            | 29                            |
| Диаметр статора, мм             | 18              | Внутренний: 30<br>Внешний: 70 |

Обработку суспензий проводили на двух миксерах – это ИКА Т25 и JRJ300D-1. Водные суспензии исходных графитов были приготовлены с помощью магнитной мешалки. Каждый образец был приготовлен с концентрацией графита 1 масс. % в суспензии. Седиментационный

анализ был проведен визуально для 25 образцов с различными параметрами приготовления. Для дальнейших исследований были выбраны образцы из числа стабильных в течение недели суспензий. Седиментация образцов проходила по-разному, некоторые образцы сразу выпали в осадок, например образец 3, другие были стабильно несколько суток и месяцев (рис. 2).

Для приготовления образцов (образцы 1–7) на миксере ИКА Т25 были смешаны вода объемом 125 мл и графит массой 1,25 г. В образцы 4, 6, 7 был добавлен ПАВ массой 1,25 г. Для приготовления образцов 8–16 на миксере JRJ300D-1 взяли минимально допустимый объем жидкости для миксера 500 мл и графит массой 5 гр. В образцы 15 и 16 был добавлен ПАВ массой 5 г. Параметры обработки и тип графита представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры обработки графита

| Номер образца | Обороты миксера, об/мин | Время обработки, мин | Марка графита | ПАВ | Тип миксера |
|---------------|-------------------------|----------------------|---------------|-----|-------------|
| 1             | 9500                    | 120                  | ГAK-2         | –   | ИКА Т25     |
| 2             | 9500                    | 60                   | ГK-1          | –   | ИКА Т25     |
| 3             | 9500                    | 120                  | ГK-1          | –   | ИКА Т25     |
| 4             | 9500                    | 60                   | ГK-1          | +   | ИКА Т25     |
| 5             | 9500                    | 60                   | ГAK-2         | –   | ИКА Т25     |
| 6             | 9500                    | 60                   | ГAK-2         | +   | ИКА Т25     |
| 7             | 9500                    | 30                   | ГAK-2         | +   | ИКА Т25     |
| 8             | 9500                    | 60                   | ГAK-2         | –   | JRJ300D-1   |
| 9             | 4000                    | 10                   | ГAK-2         | –   | JRJ300D-1   |
| 10            | 7000                    | 10                   | ГAK-2         | –   | JRJ300D-1   |
| 11            | 7000                    | 10                   | ГK-1          | –   | JRJ300D-1   |
| 12            | 9500                    | 3                    | ГK-1          | –   | JRJ300D-1   |
| 13            | 11000                   | 5                    | ГAK-2         | –   | JRJ300D-1   |
| 14            | 11000                   | 5                    | ГK-1          | –   | JRJ300D-1   |
| 15            | 11000                   | 5                    | ГK-1          | +   | JRJ300D-1   |
| 16            | 11000                   | 5                    | ГAK-2         | +   | JRJ300D-1   |

В работе использовался спектрометр DT-1202. Для описания функции распределения частиц были использованы бимодальная и нормальная функции.

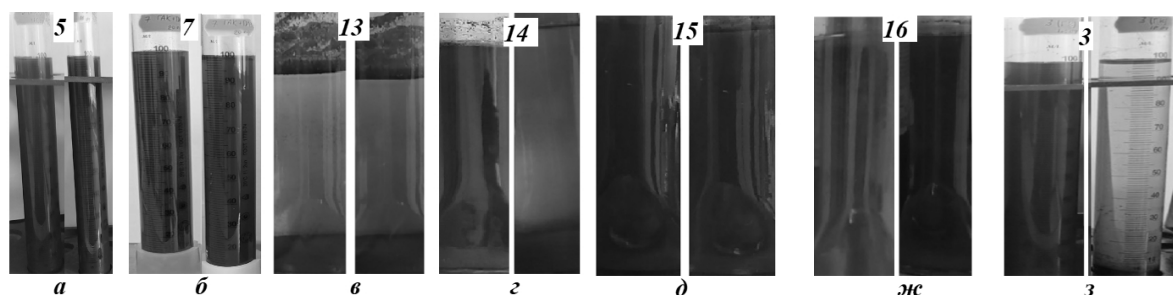


Рис. 2. Седиментация образцов суспензий сразу после приготовления (слева) и через 6 суток: 5 (а), 7 (б), 13 (в), 14 (г), 15 (д), 16 (ж) и 3 (з) сразу после приготовления и на следующий день

Fig. 2. Sedimentation of suspension samples immediately after preparation (left) and after 6 days: 5 (a), 7 (б), 13 (в), 14 (г), 15 (д), 16 (ж) and 3 (з) immediately after preparation and the next day

Для рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-3 суспензии были высушены в сушильном шкафу при температуре 70 °С в течение 2 ч. Микроструктура графена исследована с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM-2100 (при ускоряющем напряжении 200 kV), оборудованного энергодисперсионным спектрометром Oxford Inca x-sight.

### Результаты и обсуждение

Во время обработки в миксере жидкость выходит из отверстий с высокой скоростью, создавая интенсивные потоки. Этого достаточно для преодоления Ван-дер-Ваальсовых сил между слоями графита, что приводит к их расслоению. В работе [13] предполагается, что процесс диспергирования сопровождается эффектами кавитации. Кавитационные пузырьки образуются в различных точках и вносят дополнительную энергию в процесс диспергирования, способствуя более равномерному и тонкому расслоению. Кроме того, при гидродинамическом диспергировании наблюдаются активные столкновения твердых частиц, что вносит заметный вклад в конечный результат диспергирования.

Размер частиц исходных графитов представляет собой бимодальное распределение (рис. 3, *a*). Размеры дисперсной фазы в получаемых графеновых коллоидах (образцы 15 и 16) описаны как с нормальным распределением, так и бимодальным (образцы 13 и 14).

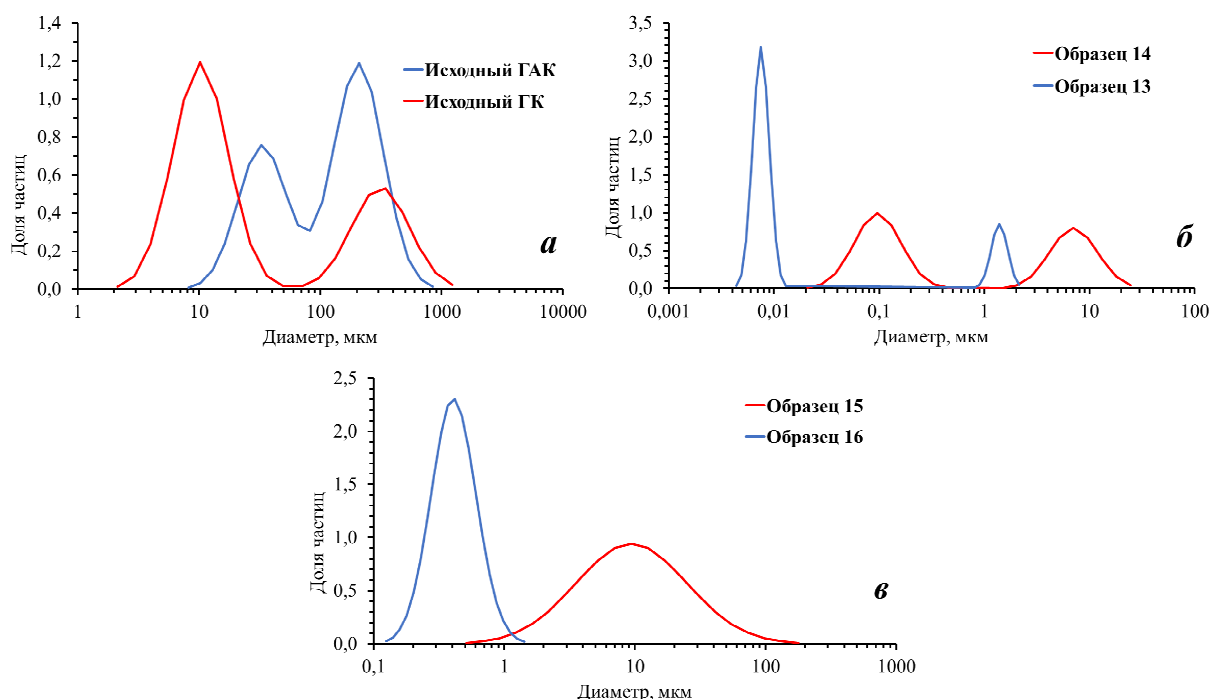


Рис. 3. Распределение частиц в исходных образцах графита (*a*) и графеновой суспензии после гидродинамической обработки в миксере (*б*, *в*)

Fig. 3. Particle distribution in the initial samples of graphite (*a*) and graphene suspension after hydrodynamic treatment in a mixer (*б*, *в*)

Параметры исследуемых образцов, полученные в результате акустической спектроскопии, сведены в табл. 4. Обработка в миксере JRJ300D-1 (образец 13) значительно уменьшает размер частиц, в 100 и более раз по сравнению с исходным графитом. Добавление поверхностно-активного вещества (ПАВ) не способствует значительному уменьшению размера частиц по сравнению с образцами без его добавления. Однако частицы становятся более однородными по размеру. Кроме того, использование ПАВ позволяет увеличить дзета-потенциал суспензии, что способствует увеличению её стабильности. Обнаружено, что в образцах 13 и 14 присутствуют графеновая фаза нанометрового размера. В образце 13 – 10 нм и в образце 14 – 100 нм. Это так называемые графеновые точки. При определенных условиях их можно преобразовать в графеновые квантовые точки. Окисление графеновых точек активными формами кислорода, которые возникают при кавитационных процессах в воде, приводит к улучшению стабильности графеновой суспензии. Окисленные графеновые точки препятствуют коагуляции графеновой части. Этот эффект показал влияние на стабильность графеновых коллоидов. Образец 14 более стабиль-

лен (90 суток), чем образец 13 (6 суток). Кроме того, на стабильность суспензий влияют примеси, которые присутствуют в исходных образцах графитов.

Таблица 4

Результаты акустической спектроскопии исследуемых образцов

| Параметр                                                     | Исходный ГАК-2 | Образец 13   | Образец 16   | Исходный ГК-1 | Образец 14 | Образец 15  |
|--------------------------------------------------------------|----------------|--------------|--------------|---------------|------------|-------------|
| Диапазон размеров частиц, мкм                                | 10–600         | 0,007–3      | 0,34–0,39    | 2–1000        | 0,02–12    | 0,8–100     |
| Пиковые значения размеров частиц, мкм                        | 30,6 и 204     | 0,01 и 2     | 0,36         | 10,2 и 324    | 0,1 и 7    | 8,5         |
| Дзета потенциал, мВ                                          | –4,5 до –9,5   | 0,2 до –0,96 | 0,7 до –1,79 | –1 до –8,8    | 5 до –16   | –5 до –1,16 |
| Соотношение распределения частиц у правого и левого пиков, % | 65 и 35        | 20 и 80      | –            | 30 и 70       | 40 и 60    | –           |

На спектре РФА (рис. 4, *а*) наблюдаются узкие пики графита при значениях  $2\theta = 11^\circ$ ,  $26,5^\circ$  и  $55^\circ$  с расстоянием 6,8, 3,38 и 1,683 Å соответственно. Там же приведен спектр РФА образца 7, на котором пики, отвечающие за графит, сохранились, но с меньшей интенсивностью. Формирование широкого гало на спектре РФА образца 5 (рис. 4, *а*) может указывать на образование мелкодисперсной рентгеноаморфной фазы. Также отмечается отсутствие пика при значении  $2\theta = 11^\circ$ . Аналогичный спектр был получен в работе [14]. В ней был осуществлен синтез графена методом восстановления аммиака, а листы графена были охарактеризованы с помощью порошковой рентгеновской дифракции с появлением дифракционных линий C(002) при  $2\theta = 26,5^\circ$ , расстояние между плоскостями – 3,35 Å. Авторы говорят о типичной структуре графита и присутствии многослойного графена.

Пики графита при рентгенофазовом анализе всегда демонстрируют крайне высокую интенсивность, что затрудняет определение дополнительных фаз в исследуемых образцах (рис. 4, *б*). Для образцов графеновой суспензии после обработки в миксере в течение 5 мин рентгеноаморфность не характерна. Однако интенсивность пиков значительно снижается на 40 % для образца 13 и на 26 % для образца 14 от исходного. Воздействие высоких скоростей сдвига влияет на отражательную способность исследуемых образцов и увеличивает их дисперсность. Образцы 13 и 14 не демонстрируют широкое гало на спектрах (рис. 4, *б*) [15].

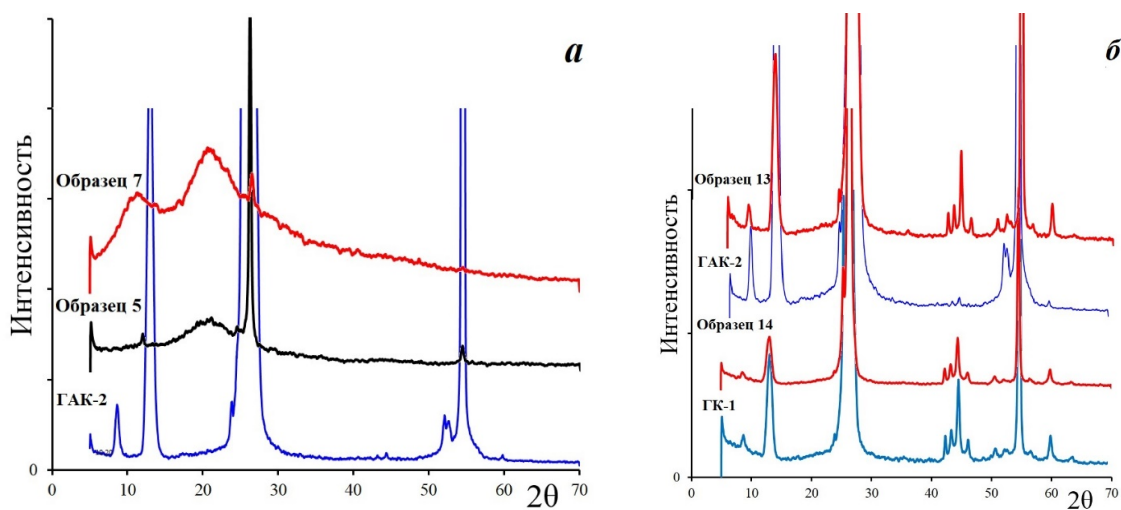


Рис. 4. РФА спектры образцов графита и твердой фракции образцов графеновой суспензии

Fig. 4. X-ray spectra of graphite samples and solid fraction of graphene suspension samples



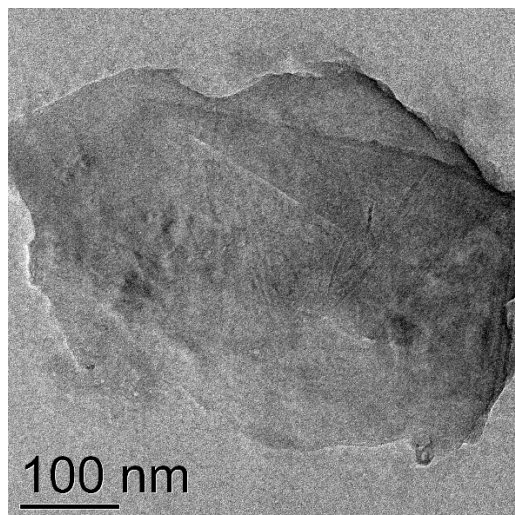


Рис. 5. Твердая фракция графеновой суспензии

Fig. 5. Solid fraction of graphene suspension

На снимке с электронного микроскопа видны прозрачные слои графена (рис. 5), что еще раз доказывает данные РФА и возможность получения графеновой суспензии с помощью жидкофазной эксфолиации из природных графитов.

### Заключение

1. Применение высокоскоростной гидродинамической технологии с использованием гидродинамических устройств с большим сдвигом позволяет получить многослойные графеновые частицы с латеральным размером до 12 мкм.

2. Выбраны режимы работы двух гидродинамических устройств (высокоскоростные миксеры ИКА Т25 (Германия) и JRJ300D-1 (Китай). Исследуемые промышленные графиты ГК-1, ГАК-2, полученные на основе природных графитов, могут успешно использоваться для получения многослойного графена путем жидкофазной эксфолиации.

3. При диспергировании графитов образуются графеновые точки, (осколки графеновых частиц) размером от 10 до 100 нм.

4. Окисление графеновых точек активными формами кислорода, которые возникают при кавитационных процессах в воде, приводит к улучшению стабильности графеновой суспензии. Окисленные графеновые точки препятствуют коагуляции графеновых частиц.

5. Получены водные графеновые суспензии для графитов ГК-1, ГАК-2 с различным временем седиментации. Для графита ГАК-2 – шесть суток, для графита ГК-1 – 90 суток, для графита ГК-1+ПАВ – 6 месяцев.

6. Наличие примесей в графитовой суспензии ухудшают процесс жидкофазной эксфолиации графита и стабильность получаемых графеновых суспензий.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00593, <https://rscf.ru/project/24-29-00593/>.

### Acknowledgements

This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation № 24-29-00593, <https://rscf.ru/en/project/24-29-00593/>.

### Библиографические ссылки

1. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov et al. // *Science*. 2004. Vol. 306, No. 5696. P. 666–669.
2. The Worldwide Graphene Flake Production / A. P. Kauling et al. // *Advanced Materials*. 2018. Vol. 30, No. 44. P. 1803784.
3. Chen J., Duan M., Chen G. Continuous mechanical exfoliation of graphene sheets via three-roll mill // *J. Mater. Chem.* 2012. Vol. 22, No. 37. P. 19625.
4. Kamel M. S. A., Oelgemöller M., Jacob M. V. Chemical vapor deposition-grown graphene transparent conducting electrode for organic photovoltaics: Advances towards scalable transfer-free synthesis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 203. P. 114740.
5. Nanda V. Heterogeneous Epitaxy: Designed Peptides Scale Graphene's Surface // *Biophysical Journal*. 2016. Vol. 110, No. 11. P. 2291–2292.
6. A review of low-cost approaches to synthesize graphene and its functional composites / A. Rasyotra et al. // *J Mater Sci*. 2023. Vol. 58, No. 10. P. 4359–4383.
7. Production and processing of graphene and related materials / C. Backes et al. // *2D Mater*. 2020. Vol. 7, No. 2. P. 022001.
8. Sonication-enhanced microfluidization for low-cost graphite exfoliation / J. C. F. Johnner et al. // *Emergent mater*. 2024.
9. Yi M., Shen Z. Kitchen blender for producing high-quality few-layer graphene // *Carbon*. 2014. Vol. 78. P. 622–626.
10. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids / K. R. Paton et al. // *Nature Mater*. 2014. Vol. 13, No. 6. P. 624–630.
11. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite / Y. Hernandez et al. // *Nature Nanotech*. 2008. Vol. 3, No. 9. P. 563–568.
12. Synthesis of atomically thin sheets by the intercalation-based exfoliation of layered materials / R. Yang et al. // *Nat. Synth*. 2023. Vol. 2, No. 2. P. 101–118.
13. A green, rapid and size-controlled production of high-quality graphene sheets by hydrodynamic forces / L. Liu et al. // *RSC Adv*. 2014. Vol. 4, No. 69. P. 36464–36470.
14. New Route to Synthesize of Graphene Nano Sheets / R. Siburian et al. // *Orient. J. Chem*. 2018. Vol. 34, No. 1. P. 182–187.
15. Scalable high yield exfoliation for monolayer nanosheets / Z. Wang et al. // *Nat Commun*. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 236.

### References

1. Novoselov K. S. et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*. 2004, Vol. 306, No. 5696, P. 666–669.
2. Kauling A. P. et al. The Worldwide Graphene Flake Production. *Advanced Materials*. 2018, Vol. 30, No. 44, P. 1803784.
3. Chen J., Duan M., Chen G. Continuous mechanical exfoliation of graphene sheets via three-roll mill. *J. Mater. Chem.* 2012, Vol. 22, No. 37, P. 19625.
4. Kamel M. S. A., Oelgemöller M., Jacob M. V. Chemical vapor deposition-grown graphene transparent conducting electrode for organic photovoltaics: Advances towards scalable transfer-free synthesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024, Vol. 203, P. 114740.
5. Nanda V. Heterogeneous Epitaxy: Designed Peptides Scale Graphene's Surface. *Biophysical Journal*. 2016, Vol. 110, No. 11. P. 2291–2292.
6. Rasyotra A. et al. A review of low-cost approaches to synthesize graphene and its functional composites. *J Mater Sci*. 2023, Vol. 58, No. 10, P. 4359–4383.
7. Backes C. et al. Production and processing of graphene and related materials. *2D Mater*. 2020, Vol. 7, No. 2, P. 022001.

8. Johnner J. C. F. et al. Sonication-enhanced microfluidization for low-cost graphite exfoliation. *Emergent mater.* 2024.
9. Yi M., Shen Z. Kitchen blender for producing high-quality few-layer graphene. *Carbon.* 2014, Vol. 78, P. 622–626.
10. Paton K. R. et al. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids. *Nature Mater.* 2014, Vol. 13, No. 6, P. 624–630.
11. Hernandez Y. et al. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite. *Nature Nanotech.* 2008, Vol. 3, No. 9, P. 563–568.
12. Yang R. et al. Synthesis of atomically thin sheets by the intercalation-based exfoliation of layered materials. *Nat. Synth.* 2023, Vol. 2, No. 2, P. 101–118.
13. Liu L. et al. A green, rapid and size-controlled production of high-quality graphene sheets by hydrodynamic forces. *RSC Adv.* 2014, Vol. 4, No. 69, P. 36464–36470.
14. Sibirian R. et al. New Route to Synthesize of Graphene Nano Sheets. *Orient. J. Chem.* 2018, Vol. 34, No. 1, P. 182–187.
15. Wang Z. et al. Scalable high yield exfoliation for monolayer nanosheets. *Nat Commun.* 2023, Vol. 14, No. 1, P. 236.

© Стебелева О. П., Кашкина Л. В., Вшивкова О. А., Минаков А. В., 2024

---

**Стебелева Олеся Павловна** – кандидат технических наук, доцент кафедры ТТиГД; Сибирский федеральный университет. E-mail: opstebeleva@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9559-1522>

**Кашкина Людмила Васильевна** – кандидат физико-математических наук, доцент; Сибирский федеральный университет. E-mail: sfugeo@mail.ru.

**Вшивкова Ольга Антоновна** – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник; КНЦ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН. E-mail: oavshivkova@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0779-3547>

**Минаков Андрей Викторович** – доктор физико-математических наук, директор ИИФирЭ; Сибирский федеральный университет. E-mail: tov-andrey@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1956-5506>

**Stebeleva Olesya Pavlovna** – Cand. Sc., Associate Professor; Siberian Federal University. E-mail: opstebeleva@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9559-1522>

**Kashkina Lyudmila Vasilevna** – Cand. Sc., Associate Professor; Siberian Federal University. E-mail: sfugeo@mail.ru.

**Vshivkova Olga Antonovna** – Cand. Sc., Junior Research Assistant; Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”. E-mail: oavshivkova@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0779-3547>

**Minakov Andrey Victorovich** – Dr. Sc., Director of the Institute; Siberian Federal University. E-mail: tov-andrey@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1956-5506>

---

Статья поступила в редакцию 15.11.2024; принята к публикации 25.11.2024; опубликована 26.12.2024

The article was submitted 15.11.2024; accepted for publication 25.11.2024; published 26.12.2024

УДК 537.312:538.911'956

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-531-538

**Для цитирования:** Харьков А. М., Ситников М. Н., Аплеснин С. С. Магнитоимпеданс в тулий марганцевом халькогениде // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 531–538. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-531-538.

**For citation:** Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Aplesnin S. S. [Magnetoimpedance in thulium manganese chalcogenide]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 531–538. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-531-538.

## Магнитоимпеданс в тулий марганцевом халькогениде

А. М. Харьков\*, М. Н. Ситников, С. С. Аплеснин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: khark.anton@mail.ru

*Управление транспортными характеристиками под действием магнитного поля является перспективным с точки зрения создания датчиков магнитного поля устойчивых к радиации. Исследуется импеданс и его компоненты в тулий марганцевом халькогениде в интервале частот  $10^2$ – $10^6$  Гц. Найдена область температур с преобладающим вкладом реактивной и активной частей импеданса. Компоненты импеданса описываются в модели Дебая. При замещении марганца ионами тулия частоты максимумов мнимой компоненты импеданса смещаются в сторону высоких частот в селениде марганца на два порядка. С ростом концентрации замещения ионами тулия в селенидах найдено два времени релаксации по сравнению с сульфидами. Найден активационный характер времени релаксации, энергия активации от концентрации ионов тулия. Установлено увеличение импеданса в магнитном поле в области малых концентраций и смена знака импеданса по температуре для больших концентраций. Магнитоимпеданс в халькогенидах проходит через максимум при нагревании образцов. Увеличение импеданса в магнитном поле обусловлено изменением диагональной компоненты диэлектрической проницаемости в магнитном поле, которая пропорциональна проводимости. Положительное значение магнитоимпеданса описывается в модели электрически неоднородной среды. Из импеданса можно получить информацию об электрической неоднородности материала.*

*Ключевые слова:* полупроводники, магнитоимпеданс, модель Дебая.

## Magnetoimpedance in thulium manganese chalcogenide

A. M. Kharkov\*, M. N. Sitnikov, S. S. Aplesnin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: khark.anton@mail.ru

*Control of transport characteristics under the influence of a magnetic field is promising from the point of view of creating magnetic field sensors resistant to radiation. The impedance and its components in thulium manganese chalcogenide in the frequency range of  $10^2$ – $10^6$  Hz are studied. The temperature range with a prevailing contribution of the reactive and active parts of the impedance is found. The impedance components are described in the Debye model. When manganese is replaced by thulium ions, the frequencies of the maxima of the imaginary component of the impedance shift toward high frequencies in manganese selenide by two orders of magnitude. With an increase in the concentration of substitution by thulium ions in selenides, two relaxation times are found, compared with sulfides. The activation nature of the*

*relaxation time, the activation energy from the concentration of thulium ions are found. An increase in impedance in a magnetic field in the region of low concentrations and a change in the sign of the impedance with temperature for high concentrations are established. Magnetoimpedance in chalcogenides passes through a maximum when heating the samples. The increase in impedance in a magnetic field is due to a change in the diagonal component of the permittivity in a magnetic field, which is proportional to the conductivity. A positive value of magnetoimpedance is described in the model of an electrically inhomogeneous medium. From the impedance, information can be obtained about the electrical inhomogeneity of the material.*

*Keywords: semiconductors, magnetoimpedance, Debye model.*

## 1. Введение

Управление транспортными характеристиками в полупроводниках под действием внешнего магнитного поля представляет интерес как с фундаментальной, так и с практической точки зрения [1–4]. В полупроводниках с неоднородным распределением электрического заряда транспортные характеристики зависят от степени неоднородности [5–8]. В спектре электронных возбуждений в запрещенной зоне образуется конечная электронная плотность на уровне химпотенциала в результате локализации заряда. При слабом легировании волновая функция электрона остается локализованной. С ростом концентрации замещения в центре зоны формируются делокализованные состояния и при некотором критическом значении возникает бесконечный кластер, при котором волновые функции электрона представляют в виде плоских волн, распространяющихся по всему кристаллу [9; 10].

Регулировать электрическую неоднородность можно за счет флуктуации валентности, концентрации и температуры [11–13]. Например, ион тулия обнаруживает трехвалентное состояние в TmS [14; 15], состояние промежуточной валентности в TmSe [16] и двухвалентное состояние в TmTe [17]. Электронная конфигурация иона  $\text{Tm}^{2+\delta}$  зависит от халькогена. Поэтому замещение иона марганца в халькогенидах MnS и MnSe ионами тулия приведет к разной энергии делокации электронов. Введение в систему TmSe нестехиометрии способствует увеличению валентности ионов тулия до  $\text{Tm}^{3+}$ .

Цель работы – выявить влияние ионов халькогена на время релаксации носителей тока, импедансные характеристики и их изменение в магнитном поле.

## 2. Влияние иона халькогена на частотную зависимость импеданса

Твердые растворы  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  синтезировали флюсовым методом из поликристаллического сульфида марганца и моносульфида тулия [18]. Образцы  $(\text{MnSe})_{1-x}(\text{Tm}_{0,76}\text{Se})_x$  получены методом твердофазной реакции в вакуумированных кварцевых ампулах в однозонной печи сопротивления. Подробно методика синтеза описана в [19]. Рентгеноструктурное исследование халькогенидов дает рентгенограмму, соответствующую ГЦК-решетке типа NaCl.

Импеданс, компоненты импеданса реагируют на изменение электронной структуры и локальной деформации решетки, которые меняют функцию распределения электронной плотности. Определение времени релаксации носителей тока является важной характеристикой определения механизма диссипации носителей тока. Релаксация может иметь как активационный, так и безактивационный тип [20].

Релаксация носителей тока на частотах выше 1 кГц проявляется при температурах выше комнатной, поэтому зависимость импеданса от частоты без поля и в магнитном поле измерим при температурах выше комнатной. На рис. 1 приведены частотные зависимости импеданса  $Z(\omega)$  и  $\text{Im}(Z(\omega))$  для  $\text{Tm}_{0,05}\text{Mn}_{0,95}\text{S}$  и  $(\text{MnSe})_{1-x}(\text{Tm}_{0,76}\text{Se})_x$ . При замещении марганца ионами тулия частоты максимумов  $\text{Im}(Z(\omega))$  смещаются в сторону высоких частот в селениде марганца на два порядка. Независимо от иона халькогена время релаксации резко меняется в окрестности 400 К (вставки на рис. 1). Ниже  $T = 400$  К в системе существует одно время релаксации в области частот  $10^2$ – $10^6$  Гц и компоненты импеданса описываются в модели Дебая:

$$\text{Im} Z(\omega) = \frac{B\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время релаксации носителей тока;  $B$  – параметр. Выше 420 К в системе появляется спектр времен релаксации. Время релаксации от температуры зависит экспоненциально  $\tau = \tau_0 \exp(E_g/T)$  с энергией активации  $E_g = 0,47$  эВ в  $(\text{MnSe})_{1-x}(\text{Tm}_{0,76}\text{Se})_x$  для  $x = 0,05$ .

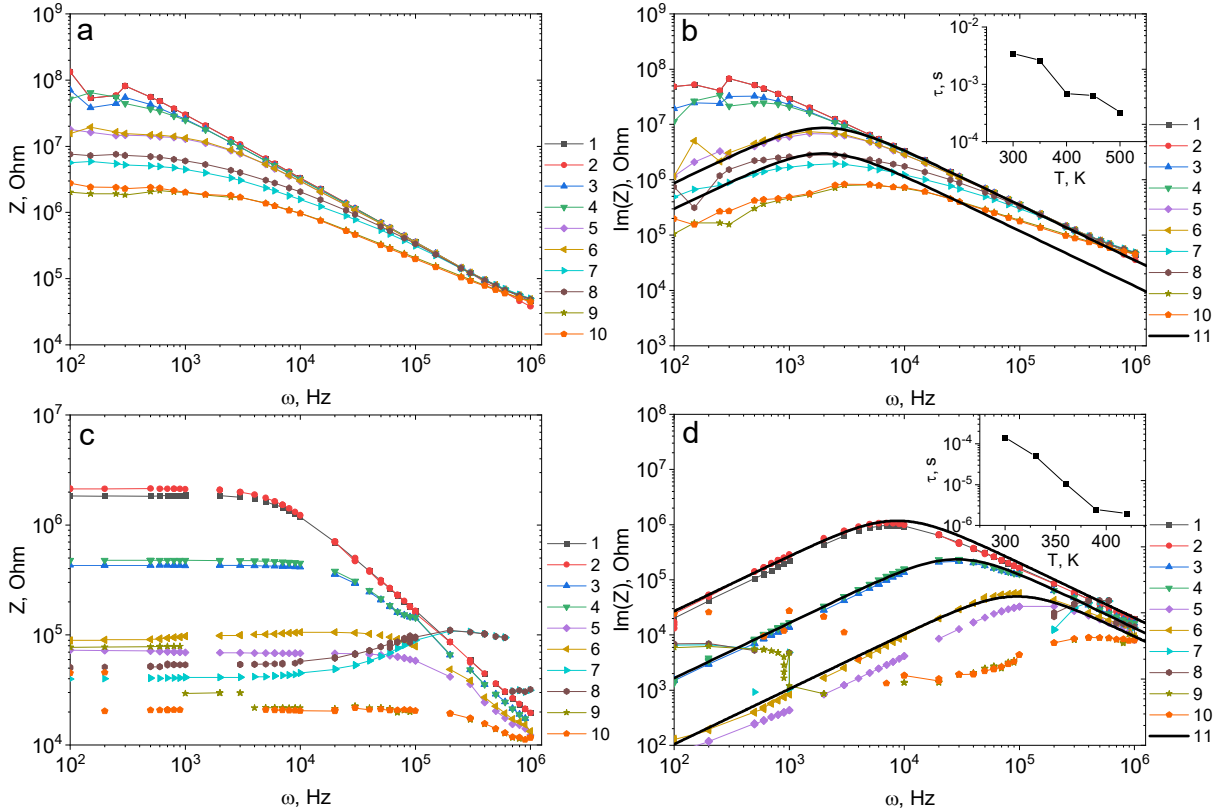


Рис. 1. Частотные зависимости импеданса  $Z$  (a, c) и мнимой части импеданса (b, d) для образцов  $\text{Tm}_{0,05}\text{Mn}_{0,95}\text{S}$  (a, b), измеренные в нулевом магнитном поле (1, 3, 5, 7, 9) и в поле 8 кЭ (2, 4, 6, 8, 10) при  $T = 300$  (1, 2), 350 (3, 4), 400 (5, 6), 450 (7, 8), 500 К (9, 10), и для образцов  $\text{Tm}_{0,04}\text{Mn}_{0,95}\text{Se}$  (c, d), измеренные в нулевом магнитном поле (1, 3, 5, 7, 9) и в поле 12 кЭ (2, 4, 6, 8, 10) при  $T = 300$  (1, 2), 330 (3, 4), 360 (5, 6), 390 (7, 8), 420 К (9, 10). Вставки: температурные зависимости времени релаксации  $\tau$ . Результаты эксперимента описаны в рамках модели Дебая (сплошные линии 11)

Fig. 1. Frequency dependences of impedance  $Z$  (a, c) and imaginary part of impedance (b, d) for  $\text{Tm}_{0,05}\text{Mn}_{0,95}\text{S}$  samples (a, b) measured in zero magnetic field (1, 3, 5, 7, 9) and in a field of 8 kOe (2, 4, 6, 8, 10) at  $T = 300$  (1, 2), 350 (3, 4), 400 (5, 6), 450 (7, 8), 500 K (9, 10) and for  $\text{Tm}_{0,04}\text{Mn}_{0,95}\text{Se}$  samples (c, d) measured in zero magnetic field (1, 3, 5, 7, 9) and in a field of 12 kOe (2, 4, 6, 8, 10) at  $T = 300$  (1, 2), 330 (3, 4), 360 (5, 6), 390 (7, 8), 420 K (9, 10). Inserts: temperature dependences of the relaxation time  $\tau$ . The experimental results are described within the Debye model (solid lines 11)

Компоненты импеданса от частоты в  $\text{Tm}_{0,1}\text{Mn}_{0,9}\text{S}$  (рис. 2, a) можно описать в модели Дебая с одним временем релаксации, которое имеет активационный вид до  $T = 450$  К с энергией активации  $E_g = 0,72$  эВ (вставка на рис. 2, b). В  $(\text{MnSe})_{1-x}(\text{Tm}_{0,76}\text{Se})_x$  с  $x = 0,1$   $\text{Im}(Z(\omega))$  хорошо описывается в модели Дебая:

$$\text{Im} Z(\omega) = \frac{A\omega\tau_1}{1 + (\omega\tau_1)^2} + \frac{B\omega\tau_2}{1 + (\omega\tau_2)^2} \quad (2)$$

с двумя временами релаксации (рис. 2, c) и с энергией активации  $E_g = 0,6$  эВ для  $\tau_1$  меньше, чем в  $\text{Tm}_{0,1}\text{Mn}_{0,9}\text{S}$ .

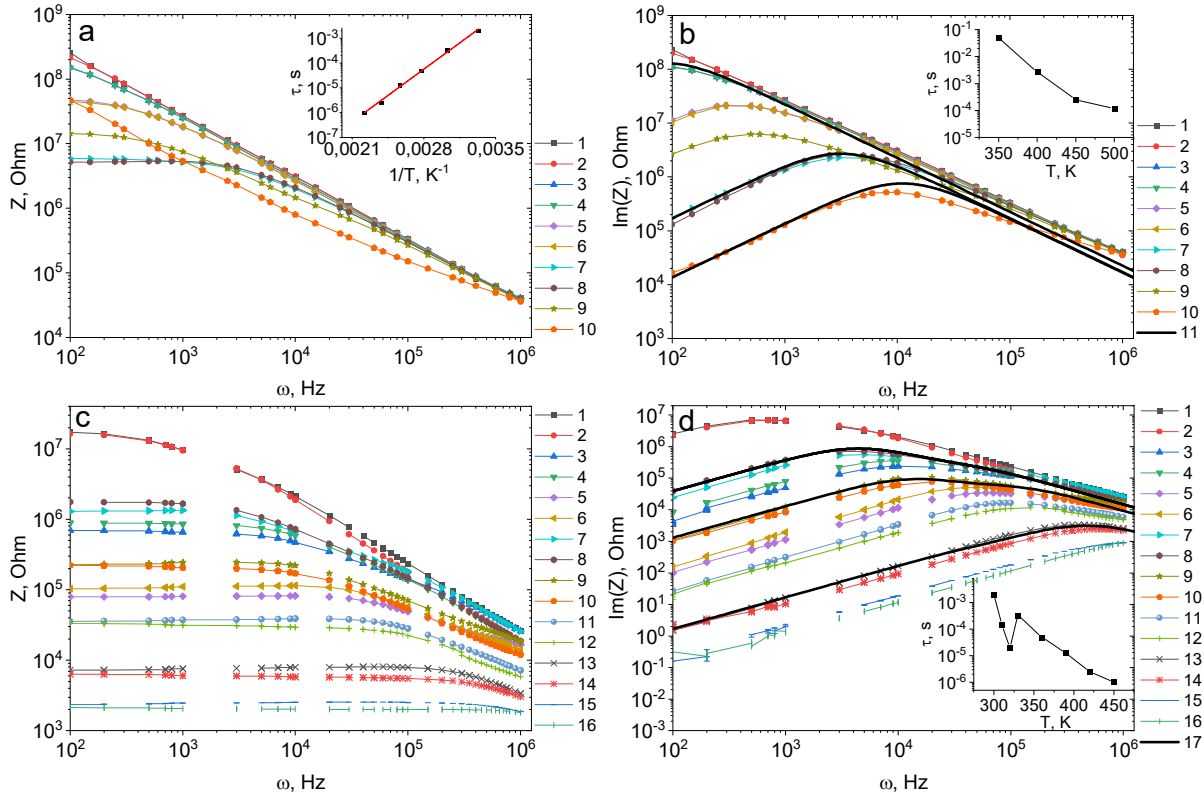


Рис. 2. Частотные зависимости импеданса  $Z$  (a, c) и мнимой части импеданса (b, d) для образцов  $\text{Tm}_{0.1}\text{Mn}_{0.9}\text{S}$  (a, b), измеренные в нулевом магнитном поле (1, 3, 5, 7, 9) и в поле 8 кЭ (2, 4, 6, 8, 10) при  $T = 300$  (1, 2), 350 (3, 4), 400 (5, 6), 450 (7, 8), 500 К (9, 10), и для образцов  $\text{Tm}_{0.08}\text{Mn}_{0.9}\text{Se}$  (c, d), измеренные в нулевом магнитном поле (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15) и в поле 12 кЭ (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16) при  $T = 300$  (1, 2), 310 (3, 4), 320 (5, 6), 330 (7, 8), 360 (9, 10), 390 (11, 12), 420 (13, 14), 450 К (15, 16). Вставки: температурные зависимости времени релаксации  $\tau$ . Результаты эксперимента описаны в рамках модели Дебая (сплошные линии 11, 17)

Fig. 2. Frequency dependences of impedance  $Z$  (a, c) and imaginary part of impedance (b, d) for  $\text{Tm}_{0.1}\text{Mn}_{0.9}\text{S}$  samples (a, b) measured in zero magnetic field (1, 3, 5, 7, 9) and in a field of 8 kOe (2, 4, 6, 8, 10) at  $T = 300$  (1, 2), 350 (3, 4), 400 (5, 6), 450 (7, 8), 500 K (9, 10) and for  $\text{Tm}_{0.08}\text{Mn}_{0.9}\text{Se}$  samples (c, d) measured in zero magnetic field (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15) and in a field of 12 kOe (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16) at  $T = 300$  (1, 2), 310 (3, 4), 320 (5, 6), 330 (7, 8), 360 (9, 10), 390 (11, 12), 420 (13, 14), 450 K (15, 16).

Inserts: temperature dependences of the relaxation time  $\tau$ . The experimental results are described within the Debye model (solid lines 11, 17)

### 3. Магнитоимпеданс

Импеданс зависит от магнитного поля и иона халькогена. На рис. 3 приведены изменения импеданса в магнитном поле, вычисленным по формуле

$$\Delta Z = (Z(\omega, H) - Z(\omega, H = 0)) / Z(\omega, H = 0), \quad (3)$$

где  $Z(\omega, H)$  импеданс в магнитном поле и без поля для  $Z(\omega, H = 0)$ . Для концентраций замещения  $x < 0,05$  импеданс увеличивается в магнитном поле и магнитоимпеданс достигает максимума  $\Delta Z = 0,35$  при  $T = 450$  К для образцов  $\text{Tm}_{0.05}\text{Mn}_{0.95}\text{S}$  и  $\Delta Z = 0,56$  при  $T = 360$  К. С ростом концентрации изменение импеданса в магнитном поле уменьшается. При нагревании магнитоимпеданс меняет знак по частоте и температуре (рис. 3, c, d).

Импеданс в халькогенидах увеличивается в магнитном поле и проходит через максимум при нагревании образцов. Увеличение импеданса обусловлено изменением диагональной компоненты диэлектрической проницаемости в магнитном поле, которая пропорциональна проводимости  $\sigma(\omega) = i\omega\epsilon$ , импеданс  $Z^2 = 1/\sigma^2 + 1/(\omega C)^2 \approx 1/\epsilon^2$ . В электрически неоднородной среде продольная компонента диэлектрической проницаемости имеет вид [21; 22]:

$$\operatorname{Re}[\varepsilon_{xx}(\omega)] = \frac{\varepsilon(1 - \beta^2 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2)}{1 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2}, \quad (4)$$

где  $\beta = \mu H$ ,  $\mu$  – подвижность,  $\tau = RC$ . Относительное изменение импеданса [23]

$$\frac{(Z(H) - Z(0))}{Z(H)} = \frac{(\varepsilon(0) - \varepsilon(H))}{\varepsilon(0)} = \frac{\beta^2}{1 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2} \quad (5)$$

и его компонент удовлетворительно описывается этой функцией в области малых концентраций (рис. 3). В результате из импеданса можно получить информацию об электрической неоднородности [24] и диэлектрической проницаемости в среде [25; 26].

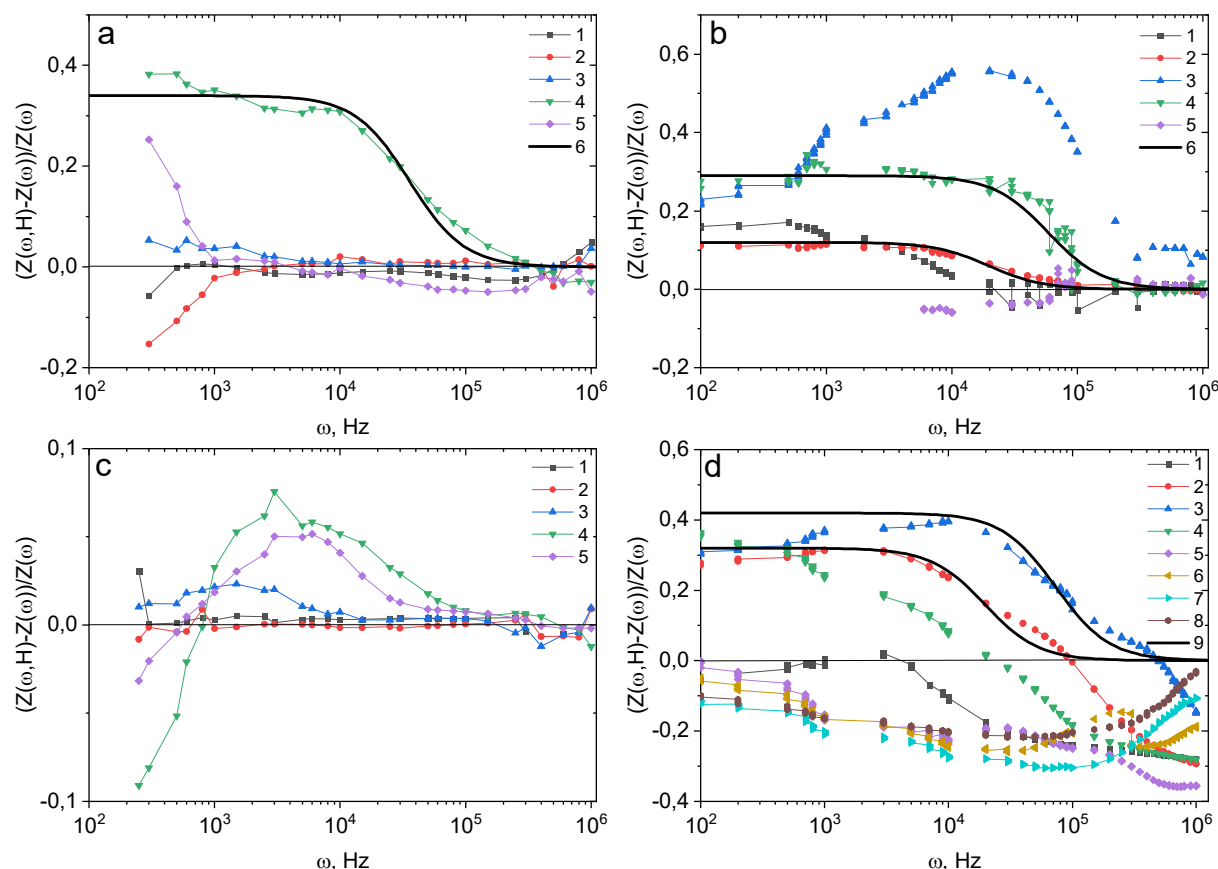


Рис. 3. Магнитоимпеданс в магнитном поле  $H = 8$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1), 350 (2), 400 (3), 450 (4), 500 К (5) для образцов  $\text{Tm}_{0.05}\text{Mn}_{0.95}\text{S}$  (a); в магнитном поле  $H = 12$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1), 330 (2), 360 (3), 390 (4), 420 К (5) для  $\text{Tm}_{0.04}\text{Mn}_{0.95}\text{Se}$  (b); в магнитном поле  $H = 8$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1), 350 (2), 400 (3), 450 (4), 550 К (5) для образцов  $\text{Tm}_{0.1}\text{Mn}_{0.9}\text{S}$  (c); в магнитном поле  $H = 12$  кЭ при температурах  $T = 300$  (1), 310 (2), 320 (3), 330 (4), 360 (5), 390 (6), 420 (7), 450 К (8) для  $\text{Tm}_{0.08}\text{Mn}_{0.9}\text{Se}$  (d). Результаты эксперимента описаны формулой (5) (сплошные линии 6, 9)

Fig. 3. Magnetoimpedance in a magnetic field of  $H = 8$  kOe at temperatures  $T = 300$  (1), 350 (2), 400 (3), 450 (4), 500 K (5) for  $\text{Tm}_{0.05}\text{Mn}_{0.95}\text{S}$  samples (a); in a magnetic field of  $H = 12$  kOe at temperatures  $T = 300$  (1), 330 (2), 360 (3), 390 (4), 420 K (5) for  $\text{Tm}_{0.04}\text{Mn}_{0.95}\text{Se}$  (b); in a magnetic field of  $H = 8$  kOe at temperatures  $T = 300$  (1), 350 (2), 400 (3), 450 (4), 550 K (5) for  $\text{Tm}_{0.1}\text{Mn}_{0.9}\text{S}$  samples (c); in a magnetic field  $H = 12$  kOe at temperatures  $T = 300$  (1), 310 (2), 320 (3), 330 (4), 360 (5), 390 (6), 420 (7), 450 K (8) for  $\text{Tm}_{0.08}\text{Mn}_{0.9}\text{Se}$  (d). The experimental results are described by formula (5) (solid lines 6, 9)

#### 4. Заключение

В  $(\text{MnSe})_{1-x}(\text{Tm}_{0.76}\text{Se})_x$  найдено превалирование реактивной части импеданса, в сульфиде  $\text{Tm}_{0.05}\text{Mn}_{0.95}\text{S}$  преобладает реальная часть импеданса. С ростом концентрации замещения мар-



ганца тулием импеданс и его компоненты увеличиваются на порядок. Возможно образование зарядового упорядочения и увеличение емкости на два порядка. Релаксация носителей заряда описывается в модели Дебая. Найден активационный характер времени релаксации и энергия активации. Для малых концентраций импеданс увеличивается в магнитном поле в халькогенидах. С ростом концентрации магнитоимпеданс меняет знак по частоте и температуре. Увеличение импеданса в поле вызвано уменьшением диэлектрической проницаемости в магнитном поле.

### Благодарности

Работа поддержана Российским научным фондом, Правительством Красноярского края и проектом Красноярского научного фонда № 23-22-10016.

### Acknowledgements

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-22-10016, the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

### Библиографические ссылки

1. Magnetic-field-induced miniband conduction in semiconductor superlattices / D. Fowler, D. P. A. Hardwick, A. Patanè et al. // *Phys. Rev. B* 2007. Vol. 76. P. 245303.
2. Hod O., Baer R., Rabani E. Magnetoresistance of nanoscale molecular devices based on Aharonov–Bohm interferometry // *J. Phys.: Cond. Matt.* 2008. Vol. 20. P. 383201.
3. Resolving electron and hole transport properties in semiconductor materials by constant light-induced magneto transport / A. Musiienko, F. Yang, T. W. Gries et al. // *Nat. Comm.* 2024. Vol. 15. P. 316.
4. Charge transport in mixed metal halide perovskite semiconductors / S. P. Senanayak, K. Dey, R. Shivanna et al. // *Nat. Mater.* 2023. Vol. 22. P. 216–224.
5. Hu J., Rosenbaum T. F., Betts J. B. Current Jets, Disorder, and Linear Magnetoresistance in the Silver Chalcogenides // *Phys. Rev. Lett.* 2005. Vol. 95. P. 186603.
6. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sitnikov M. N. Regulation of the thermopower and ultrasound by magnetic field in manganese sulfide doped with variable-valence ions // *Eur. Phys. J. Plus* 2024. Vol. 139. P. 247.
7. Electro-sound and asymmetry of the I–V characteristic induced by ultrasound in the  $\text{Re}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  ( $\text{Re} = \text{Tm}, \text{Yb}$ ) / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, O. B. Romanova et al. // *Eur. Phys. J. Plus* 2022. Vol. 137. P. 226.
8. Аплеснин С. С., Ситников М. Н. Магнитотранспортные эффекты в парамагнитном состоянии в  $\text{Gd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  // *Письма в ЖЭТФ*. 2014. Т. 100, вып. 2. С. 104–110.
9. Evers F., Mirlin A. D. Anderson transitions // *Rev. Mod. Phys.* 2008. Vol. 80. P. 1355.
10. Nakayama T., Yakubo K. Anderson Transition // *Fract. Conc. Cond. Matt. Phys.* 2003. Vol. 140. P. 115–147.
11. Reim W., Wachter P. First Observation of a Magnetic-Exchange–Induced Valence Transition // *Phys. Rev. Lett.* 1985. Vol. 55. P. 871.
12. Kaldis E., Fritzler B. Valence and phase instabilities in TmSe crystals // *Prog. Sol. St. Chem.* 1982. Vol. 14. P. 95–139.
13. Understanding the valency of rare earths from first-principles theory / P. Strange, A. Svane, W. M. Temmerman et al. // *Nature* 1999. Vol. 399. P. 756.
14. Wachter P. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths // *Phys. Rev. B*. 1989. P. 132.
15. Reim W., Wachter P. First Observation of a Magnetic-Exchange–Induced Valence Transition // *Phys. Rev. Lett.* 1985. Vol. 55. P. 871.
16. Valence and magnetic ordering in intermediate valence compounds: TmSe versus  $\text{SmB}_6$  / J. Derr, G. Knebel, G. Lapertot et al. // *J. Phys.: Cond. Matt.* 2006. Vol. 18. P. 2089.

17. Magnetodielectric effect and spin state of iron ions in iron-substituted bismuth pyrostannate / L. V. Udod, S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov et al. // *Eur. Phys. J. Plus* 2020. Vol. 135. P. 776.
18. Magnetic properties and the metal-insulator transition in  $\text{Gd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  solid solutions / O. B. Romanova, L. I. Ryabinkina, V. V. Sokolov et al. // *Sol. St. Comm.* 2010. Vol. 150. P. 602–604.
19. Structural and electronic transitions in thulium-substituted manganese selenide / O. B. Romanova, S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov et al. // *Ceram. Int.* 2022. Vol. 48, Is. 20. P. 29822–29828.
20. Magnetoresistance and magnetoimpedance in holmium manganese sulfides / O. B. Romanova, S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov et al. // *Appl. Phys. A* 2022. Vol. 128. P. 124.
21. Parish M. M., Littlewood P. B. Magnetocapacitance in Nonmagnetic Composite Media // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101. P. 166602.
22. Effect of the Electrical Inhomogeneity on the Magnetocapacitance Sign Change in the  $\text{Ho}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  Semiconductors upon Temperature and Frequency Variation / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov, H. Abdelbaki // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2023. Vol. 34. P. 284.
23. Аплеснин С. С., Харьков А. М., Ситников М. Н. Регулирование энергии активации и магнитоимпеданса частотой переменного тока в сульфиде марганца с частичным замещением ионами самария // *ФТТ.* 2023. Т. 65, вып. 11. С. 1882–1888.
24. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  solid solution / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov et al. // *Phys. Stat. Sol. B* 2019. Vol. 256. P. 1900043.
25. Petrovsky V., Manohar A., Dogan F. Dielectric constant of particles determined by impedance spectroscopy // *J. Appl. Phys.* 2006. Vol. 100. P. 014102.
26. Gonzalez J. R., Sinclair D. C., West A. R. Impedance and Dielectric Spectroscopy of Functional Materials: A Critical Evaluation of the Two Techniques // *J. Electrochem. Soc.* 2023. Vol. 170, No. 11. P. 6504.

## References

1. Fowler D., Hardwick D. P. A., Patanè A. et al. Magnetic-field-induced miniband conduction in semiconductor superlattices. *Phys. Rev. B* 2007, Vol. 76, P. 245303.
2. Hod O., Baer R., Rabani E. Magnetoresistance of nanoscale molecular devices based on Aharonov–Bohm interferometry. *J. Phys.: Cond. Matt.* 2008, Vol. 20, P. 383201.
3. Musiienko A., Yang F., Gries T. W. et al. Resolving electron and hole transport properties in semiconductor materials by constant light-induced magneto transport. *Nat. Comm.* 2024, Vol. 15, P. 316.
4. Senanayak S. P., Dey K., Shivanna R. et al. Charge transport in mixed metal halide perovskite semiconductors. *Nat. Mater.* 2023, Vol. 22, P. 216–224.
5. Hu J., Rosenbaum T. F., Betts J. B. Current Jets, Disorder, and Linear Magnetoresistance in the Silver Chalcogenides. *Phys. Rev. Lett.* 2005, Vol. 95, P. 186603.
6. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sitnikov M. N. Regulation of the thermopower and ultrasound by magnetic field in manganese sulfide doped with variable-valence ions. *Eur. Phys. J. Plus* 2024, Vol. 139, P. 247.
7. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Romanova O. B. et al. Electro-sound and asymmetry of the I–V characteristic induced by ultrasound in the  $\text{Re}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  ( $\text{Re} = \text{Tm}, \text{Yb}$ ). *Eur. Phys. J. Plus.* 2022, Vol. 137, P. 226.
8. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. [Magnetotransport effects in the paramagnetic state in  $\text{Gd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ]. *Letters to JETP.* 2014, Vol. 100, Is. 2, P. 104–110 (In Russ.).
9. Evers F., Mirlin A. D. Anderson transitions. *Rev. Mod. Phys.* 2008, Vol. 80, P. 1355.
10. Nakayama T., Yakubo K. Anderson Transition. *Fract. Conc. Cond. Matt. Phys.* 2003, Vol. 140, P. 115–147.
11. Reim W., Wachter P. First Observation of a Magnetic-Exchange–Induced Valence Transition. *Phys. Rev. Lett.* 1985, Vol. 55, P. 871.
12. Kaldis E., Fritzler B. Valence and phase instabilities in  $\text{TmSe}$  crystals. *Prog. Sol. St. Chem.* 1982, Vol. 14, P. 95–139.

13. Strange P., Svane A., Temmerman W. M., et al. Understanding the valency of rare earths from first-principles theory. *Nature* 1999, Vol. 399, P. 756.
14. Wachter P. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. *Phys. Rev. B* 1989, P. 132.
15. Reim W., Wachter P. First Observation of a Magnetic-Exchange-Induced Valence Transition. *Phys. Rev. Lett.* 1985, Vol. 55, P. 871.
16. Derr J., Knebel G., Lapertot G. et al. Valence and magnetic ordering in intermediate valence compounds: TmSe versus SmB<sub>6</sub>. *J. Phys.: Cond. Matt.* 2006, Vol. 18, P. 2089.
17. Udod L. V., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. et al. Magnetodielectric effect and spin state of iron ions in iron-substituted bismuth pyrostannate. *Eur. Phys. J. Plus* 2020, Vol. 135, P. 776.
18. Romanova O. B., Ryabinkina L. I., Sokolov V. V. et al. Magnetic properties and the metal-insulator transition in Gd<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S solid solutions. *Sol. St. Comm.* 2010, Vol. 150, P. 602–604.
19. Romanova O. B., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. et al. Structural and electronic transitions in thulium-substituted manganese selenide. *Ceram. Int.* 2022, Vol. 48, Is. 20, P. 29822–29828.
20. Romanova O. B., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., et al. Magnetoresistance and magnetoimpedance in holmium manganese sulfides. *Appl. Phys. A* 2022, Vol. 128, P. 124.
21. Parish M. M., Littlewood P. B. Magnetocapacitance in Nonmagnetic Composite Media. *Phys. Rev. Lett.* 2008, Vol. 101, P. 166602.
22. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Abdelbaki H. Effect of the Electrical Inhomogeneity on the Magnetocapacitance Sign Change in the Ho<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S Semiconductors upon Temperature and Frequency Variation. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2023, Vol. 34, P. 284.
23. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sitnikov M. N. [Turning of activation energy and magnetoimpedance by alternating current frequency in manganese sulfide with partial substitution by samarium ions]. *FTT*. 2023, Vol. 65, Is. 11, P. 1882–1888 (In Russ.).
24. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Kharkov A. M. et al. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered Tm<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S solid solution. *Phys. Stat. Sol. B* 2019, Vol. 256, P. 1900043.
25. Petrovsky V., Manohar A., Dogan F. Dielectric constant of particles determined by impedance spectroscopy. *J. Appl. Phys.* 2006, Vol. 100, P. 014102.
26. Gonzalez J. R., Sinclair D. C., West A. R. Impedance and Dielectric Spectroscopy of Functional Materials: A Critical Evaluation of the Two Techniques. *J. Electrochem. Soc.* 2023, Vol. 170, No. 11, P. 6504.

© Харьков А. М., Ситников М. Н., Аплеснин С. С., 2024

**Харьков Антон Михайлович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: khark.anton@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0954-9094>

**Ситников Максим Николаевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kineru@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7163-1801>

**Аплеснин Сергей Степанович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: aplesnin@sibsau.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6176-4248>

**Kharkov Anton Mikhailovich** – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Physics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: khark.anton@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0954-9094>

**Sitnikov Maksim Nikolaevich** – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Physics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kineru@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7163-1801>

**Aplesnin Sergey Stepanovich** – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: aplesnin@sibsau.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6176-4248>

Статья поступила в редакцию 07.10.2024; принята к публикации 08.10.2024; опубликована 26.12.2024

The article was submitted 07.10.2024; accepted for publication 08.10.2024; published 26.12.2024

УДК 621.9.048

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-539-549

**Для цитирования:** Шероховатость поверхности при электро-контактно-электрохимической обработке с вибрацией катода-инструмента / И. Я. Шестаков, Л. А. Семенова, В. И. Шестаков и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 539–459. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-539–549.

**For citation:** Shestakov I. Ya., Semenova L. A., Shestakov V. I., Shvaleva N. A., Remizov I. A. [The surface roughness during electro-contact-electrochemical machining with vibration of a cathode-tool]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 539–549. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-539-549.

## Шероховатость поверхности при электро-контактно-электрохимической обработке с вибрацией катода-инструмента

И. Я. Шестаков<sup>1\*</sup>, Л. А. Семенова<sup>1</sup>, В. И. Шестаков<sup>1</sup>,  
Н. А. Швалёва<sup>1</sup>, И. А. Ремизов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный 79

<sup>3</sup>Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого  
Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1

E-mail: yakovlevish@mail.ru

Электроэрозионная и электрохимическая обработки металлов используются в производстве деталей авиационной и ракетной техники, особенно электроэрозионная. В металлургии применяется разновидность электроэрозионной обработки – электроконтактная. В работе исследуется комбинированный способ обработки металлов, включающий электроконтактный и электрохимический методы с использованием вибрации электрода-инструмента. С помощью этого метода осуществляются копировально-прошивочные операции при изготовлении деталей из металлов труднообрабатываемых механическим способом. Особенностью вышеупомянутого способа электрообработки является формирование шероховатости поверхности обрабатываемого металла за счёт анодного растворения и процесса электроэрозии. Боковая поверхность обрабатываемой заготовки формируется за счёт электрохимических процессов. Торцевая поверхность образуется за счёт электроконтактной обработки. На основании литературных данных для импульсной электрохимической обработки и экспериментов получены выражения для расчёта параметра шероховатости боковой поверхности. Формула учитывает время анодного растворения за один период колебания катода-инструмента, напряжение на электродах и концентрацию электролита. Расчёт параметра шероховатости торцевой поверхности производится аналогично выражению для электроэрозионной обработки, только вместо длительности электрического импульса используется длительность касания электродов. Проведённые опыты подтвердили правильность используемых выражений и позволили получить зависимость коэффициента от частоты вибрации катода-инструмента.

**Ключевые слова:** электро-контактно-электрохимический способ, вибрация, электролит, боковая поверхность, торцевая поверхность, шероховатость поверхности.

## The surface roughness during electro-contact-electrochemical machining with vibration of a cathode-tool

I. Ya. Shestakov<sup>1\*</sup>, L. A. Semenova<sup>1</sup>, V. I. Shestakov<sup>1</sup>,  
N. A. Shvaleva<sup>1</sup>, I. A. Remizov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>3</sup>Prof. V. F. Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University

1, Partizana Zheleznyaka St., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

\*E-mail: yakovlevish@mail.ru

*Electrical discharge machining and electrochemical machining of metals are used in the production of parts for aircraft and rocket technology, especially electrical discharge machining. A type of electrical discharge machining, electrical contact machining, is used in metallurgy. The paper investigates a combined method of metal machining, including electrical contact and electrochemical methods using vibration of the electrode tool. This method is used for copying and piercing operations in the manufacture of parts from metals that are difficult to machine mechanically. The peculiarity of the above-mentioned method of electrical machining is the formation of surface roughness of the metal being machined due to anodic dissolution and the electrical discharge machining process. The side surface of the workpiece is formed due to electrochemical processes. The end surface is formed due to electrical contact machining. Based on literature data for pulsed electrochemical machining and experiments, expressions for calculating the roughness parameter of the side surface are obtained. The formula takes into account the time of anodic dissolution for one period of oscillation of the cathode tool, the voltage on the electrodes and the concentration of the electrolyte. The calculation of the roughness parameter of the end surface is carried out similarly to the expression for electrical discharge machining, but instead of the duration of the electric pulse, the duration of contact of the electrodes is used. The experiments carried out confirmed the correctness of the expressions used and made it possible to obtain the dependence of the coefficient on the vibration frequency of the cathode-tool.*

*Keywords: electro-contact-electrochemical method, vibration, electrolyte, side surface, end surface, surface roughness.*

### Введение

Развитие современной техники связано с применением металлов и сплавов трудно обрабатываемых механическими способами, поэтому всё шире используются методы электрообработки в том числе и комбинированные [1]. В настоящее время известно много комбинированных методов электрообработки. Обзор этих методов представлен в работах [1; 2]. Наибольшее внимание исследователей привлекла электроэрозионно-химическая обработка (ЭЭХО) металлов, о чём свидетельствуют многочисленные публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций [3–8]. Отличительной особенностью этого метода обработки является осуществление электрохимической обработки (ЭХО) в проточном электролите на режиме искрения, переходящим в дуговой разряд, и поддержании межэлектродного зазора (МЭЗ) постоянным. При исследовании ЭЭХО прошивки отверстий с целью интенсификации удаления продуктов обработки из межэлектродного зазора была использована вибрация электрода-инструмента (ЭИ) [9; 10]. При скорости подачи ЭИ больше, чем скорость съёма металла, происходит касание с обрабатываемой деталью. При кратковременном касании загорается дуга, что приводит к эрозионному удалению обрабатываемого металла. Этот метод авторы вышеупомянутой работы назвали электро-контактно-электрохимический способ обработки (ЭКЭХО) металлов.

В работе представлена зависимость скорости прошивки от глубины отверстия и частоты вибрации электрода-инструмента и не упоминается о качестве полученной поверхности. Публикаций по этому способу не обнаружено.

Шероховатость поверхности является важнейшим показателем качества деталей, влияющая на многие эксплуатационные и технические характеристики машин и приборов (табл. 1).

Шероховатость поверхности оказывает влияние на процессы трения и износа, ударную прочность, вибрационную активность, обтекаемость жидкостями и газами, герметичность соединений, электроконтактное сопротивление, отражение электромагнитных волн от поверхности, теплопроводность и радиационные свойства, прочность и качество покрытий.

Таблица 1

**Основные технологические факторы, определяющие эксплуатационные характеристики деталей машин и приборов**

| Эксплуатационные характеристики деталей | Микрогеометрия (шероховатость) | Направление следов обработки | Наклёп | Микротвёрдость | Макрогеометрия |
|-----------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------|----------------|----------------|
| Усталостная прочность (выносливость)    | +                              |                              | +      | +              | +              |
| Износоустойчивость                      | +                              | +                            | +      | +              | +              |
| Прочность прессовых соединений          | +                              | +                            | +      | +              | +              |
| Стабильность посадок                    | +                              | +                            | +      | +              | +              |
| Коррозионная устойчивость               | +                              |                              | +      |                |                |
| Эрозионная устойчивость                 | +                              |                              | +      |                |                |
| Теплопередача                           | +                              |                              | +      |                |                |
| Момент трения                           | +                              | +                            | +      | +              | +              |

Из вышеприведённого следует, что шероховатость поверхности оказывает влияние на многие эксплуатационные и технические характеристики деталей машин и приборов

Цель работы – выявить аналитическую зависимость показателя качества шероховатости поверхности от параметров обработки. В отраслевой научно-исследовательской лаборатории при Сибирском государственном аэрокосмическом университете имени академика М. Ф. Решетнева работы по ЭКЭХО продолжались. Исследовано влияние частоты и амплитуды вибрации ЭИ на его износ, производительность обработки, выявлены явления, происходящие в межэлектродном зазоре, изменяющемся от нуля до размаха колебаний ЭИ. По материалам исследований опубликованы статьи и получен патент на способ ЭКЭХО [11].

### Материалы и методы исследования

ЭКЭХО – это комбинированный метод, состоящий из электрохимической и электроконтактной обработок. Электроконтактная обработка является разновидностью электроэрозионной обработки (ЭЭО). Процессы в канале электрического разряда влияют на скорость съема металла, шероховатость поверхности, точность обработки, стойкость ЭИ, структурные изменения в ЭИ, заготовке и рабочей жидкости.

Шероховатость поверхности при ЭЭО сталей составляет  $R_a 0,3–0,6$  мкм на прямой полярности в электроискровом режиме, при электроимпульсном режиме  $R_z 20–40$  мкм [11]. Причем параметр  $R_z$  определяется энергией импульса:

$$R_z = k A^P, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от режима обработки, материала ЭИ, размеров, вида и состояния рабочей среды. Для сталей  $k = 2 \dots 12$  при чистовых режимах;  $k = 10 \dots 50$  – для черновых;

$p$  – показатель степени, характеризующий форму лунки,  $p = 0,3 \dots 0,04$ ;  $A$  – энергия импульса, определяется произведением средних значений тока и напряжения на длительность импульса, Дж.

В работе [17] предлагается для расчета параметра шероховатости  $R_z$  при ЭЭО использовать следующую зависимость:

$$R_z = k A^x \tau_n^y, \quad (2)$$

где  $\tau_n$  – длительность импульса;  $x, y$  – показатели степени.

Экспериментально установлены значения показателей степени при обработке сплавов на никелевой основе и для стали 12Х18Н9Т.

Введение длительности импульсов в выражении (2) показало, что наибольшее влияние на шероховатость оказывает энергия импульса.

При комбинированной ЭЭХО шероховатость поверхности в основном зависит от энергии импульсов тока, обуславливающих электроэрозионное разрушение материала, и определяется по выражению [18]:

$$R_z = K A^{1/3}, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от обрабатываемого металла и для углеродистых сталей  $K = 0,12$  мм/Дж.

Энергию импульсов предлагается определять по формуле

$$A = \frac{UI}{f(1+a)}, \quad (4)$$

где  $U$  – напряжение горения дуги;  $I$  – рабочий ток;  $f$  – частота следования импульсов;  $a$  – коэффициент, равный отношению средней плотности тока, обусловленный процессом электроэрозии, к средней плотности тока, обусловленной процессом анодного растворения, обычно  $a = 0,1 \dots 1,2$ . При ЭХХО  $a = 1,2 \dots 2,0$ , при ЭКЭХО частота  $f$  равна частоте колебаний ЭИ.

При электрохимической обработке титана и его сплавов в импульсном режиме [19] получена эмпирическая зависимость параметра шероховатости  $R_a$  от режимов процесса:

$$R_a = U^{-1,54} \tau_n^{1,41} T^{1,54} c^{-0,21}, \quad (5)$$

где  $U$  – напряжение на электродах;  $\tau_n$  – длительность импульса тока;  $T$  – период импульса тока;  $c$  – концентрация электролита.

При ЭКЭХО используется постоянное напряжение, поэтому анодное растворение боковой поверхности обрабатываемой детали происходит непрерывно, исключая момент касания электродов, так как в это время напряжение между электродами близко к нулю. С учетом этого и экспериментальных данных выражение (5) примет вид

$$R_a = k U^{0,5} \frac{\tau_y}{\tau_a} c^{-0,5}, \quad (6)$$

где  $k = 0,1$  В·мкм, постоянный множитель;  $U$  – среднее напряжение на электродах;  $\tau_y$  – время установления стабильного значения шероховатости поверхности, в большинстве случаев  $\tau_y = 8 \dots 10$  с;  $\tau_a$  – время анодного растворения за один период колебания катода-инструмента.

Формирование шероховатости поверхности происходит за счет протекания двух процессов: электрической эрозии и анодного растворения.

Шероховатость поверхности  $R_z$  поверхности, формируемой торцом катода-инструмента можно оценить по выражению

$$R_z = k(A_{эл} + A_{мех})^P, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от режима обработки материала обрабатываемой детали, в общем случае  $k = 2 \dots 50$ ;  $A_{эл}$  – электрическая энергия, выделяющаяся в МЭЗе, Дж;  $A_{мех}$  – механическая энергия колеблющейся массы, Дж;  $p$  – показатель степени,  $p = 0,3 \dots 0,04$ .

Электрическая энергия определяется по формуле

$$A_{эл} = UI\tau_э, \quad (8)$$

где  $U$  – среднее напряжение во время обработки, В;  $I$  – среднее значение силы тока во время обработки, А;  $\tau_э$  – время эрозионного разрушения за один период колебаний катода-инструмента, с.

Механическая энергия определяется по выражению

$$A_{мех} = m f^2 A^2, \quad (9)$$

где  $m$  – масса ЭИ, кг;  $f$  – частота колебаний ЭИ, Гц;  $A$  – амплитуда колебаний ЭИ, м.

Из выражения (7) следует, что шероховатость поверхности, формируемой под торцом ЭИ определяется механическим и эрозионным воздействием, так называемым электромеханическим сглаживанием, которое способствует получению высокого качества поверхности ( $Ra$  0,1 мкм и менее). Изменяя частоту колебаний, тем самым меняется соотношение длительностей эрозионного и электрохимического воздействий. Это позволяет изменять шероховатость поверхности обрабатываемой детали.

### Результаты и обсуждение

Опыты проводились на установке для электрообработки на базе электродинамического привода [20]. Общий вид установки и компоновка её элементов приведены на рис. 1 и 2.

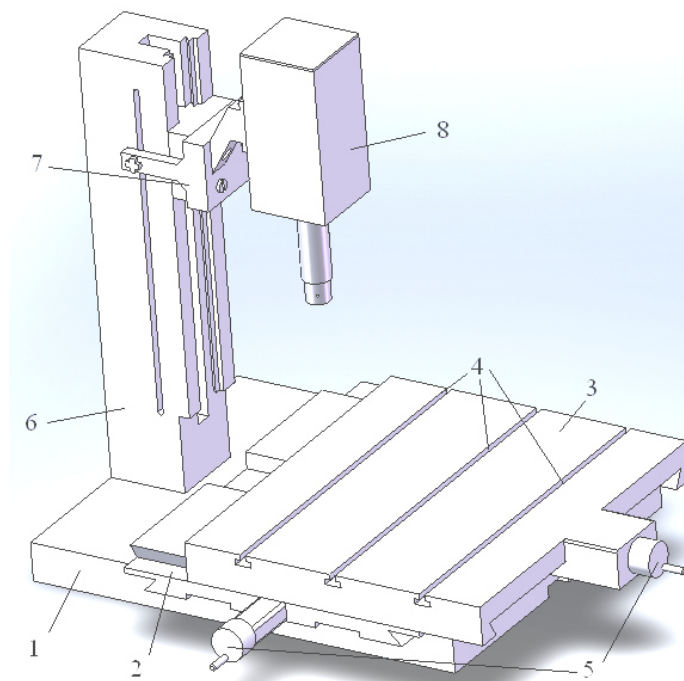


Рис. 1. Внешний вид электроконтактно-химической установки без ванны:  
1 – основание; 2 – средняя часть основания; 3 – верхняя часть основания; 4 – пазы;  
5 – маховики; 6 – стойка; 7 – держатель; 8 – ЛЭДД

Fig. 1. External appearance of the electrocontact-chemical installation without a bath:  
1 – base; 2 – middle part of the base; 3 – upper part of the base; 4 – grooves;



5 – flywheels; 6 – stand; 7 – holder; 8 – LEDD

Разработанная установка представляет собой настольный вариант электроконтактно-химического станка (рис. 1). Ванна выполнена из листовой нержавеющей стали, крепится к столу (3) через диэлектрическую пластину.

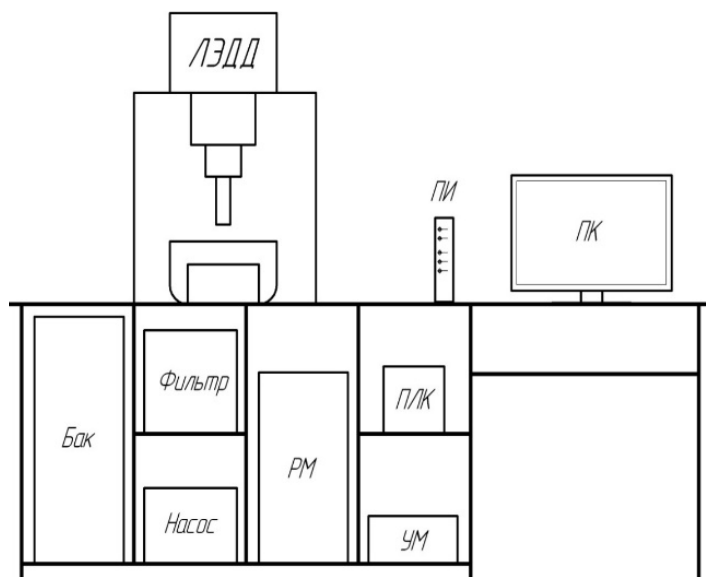


Рис. 2. Компоновка элементов установки электроконтактнохимической обработки:  
ЛЭДД – линейный электродинамический двигатель; РМ – распределитель мощности;  
ПЛК – программируемый логический контроллер; УМ – усилитель мощности;  
ПИ – панель индикации; ПК – персональный компьютер

Fig. 2. Layout of elements of the installation for electrocontact chemical processing:  
LEDD – linear electrodynamic motor; PM – power distributor; PLC – programmable logic controller;  
PA – power amplifier; PI – display panel; PC – personal computer

Установка снабжена системой управления частотой колебаний электрода-инструмента в диапазоне от единиц до 100 Гц (рис. 3).

Система управления предусматривает устройство подачи рабочей жидкости (УПРЖ), необходимое для автоматического наполнения ванны электролитом. УПРЖ включает в себя насос, картриджный фильтр, бак, шланг подачи и шланг слива. Уровень жидкости регулируется поплавковым датчиком, установленным внутри рабочей ванны.

Вводимые параметры регистрируются системой АЦП, осуществляющей обратную связь и через контроллер поступают на панель индикации, где отображается работа элементов.

В данной установке предусмотрена система регистрации перемещения электрода-инструмента при помощи датчика линейных перемещений.

При помощи этого датчика регистрируется и анализируется глубина обработки. Данный датчик является одним из основных элементов обратной связи в системе. С его помощью система управления варьирует выходные параметры, которые необходимы для обработки заготовки на данном этапе. Питание датчика осуществляется непосредственно от контроллера.

Для измерения шероховатости боковой поверхности образцы выполнялись разъёмными, т. е. состояли из двух половинок. Для измерения шероховатости боковой поверхности использовали профилометры модели 296, торцевой поверхности – двойной микроскоп МИС-11. В качестве электролита применяли водный раствор нитрата натрия концентрацией 2,5 г/л. Во время опытов фиксировались средние значения тока и напряжения, снимались осциллограммы тока, на-

пряжения и межэлектродного зазора. По осциллограммам определялось время анодного растворения и время эрозионного разрушения металла заготовки. Глубина отверстия была равна 10 мм.

Материал образцов – сталь ХВГ. Катод-инструмент в виде цилиндрической медной трубки, наружный диаметр которой равен 7,9 мм; внутренний диаметр 5,8 мм, соединяли с виброприбором. Подача электролита в межэлектродный зазор осуществлялась через катод-инструмент. Масса катода-инструмента 1 кг. Параметры обработки представлены в табл. 2, результаты расчётов и измерений шероховатости поверхностей – в табл. 3.

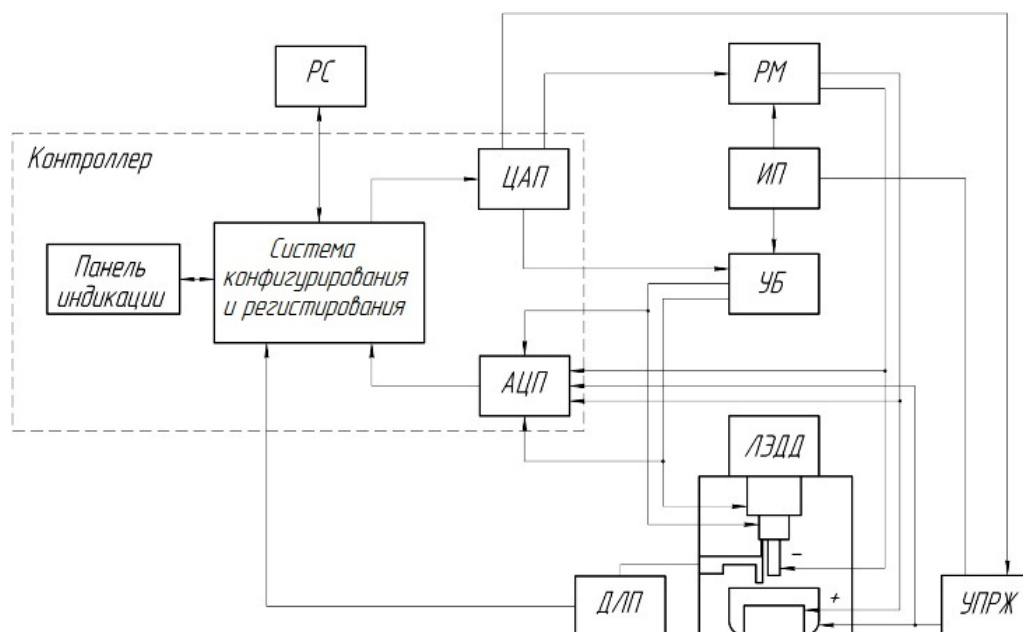


Рис. 3. Блок-схема управления установкой ЭКХО:

РМ – распределитель мощности; ИП – источник питания; УБ – усилительный блок; УПРЖ – устройство подачи рабочей жидкости; РС – персональный компьютер; ДЛП – датчик линейных перемещений; ЛЭДД – линейный электродинамический двигатель; ЦАП – цифровой аналоговый преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Fig. 3. Block diagram of control of the ECHO installation:

RM – power distributor; IP – power source; UB – amplifier block; UPRL – working fluid supply device; PC – personal computer; DLP linear displacement sensor; LEDD-linear electrodynamic motor; DAC – to digital analog converter; ADC – analog-to-digital converter

Анализ данных табл. 2 показал, что значение коэффициента  $k$  в формуле (7) связано с соотношением частот выражением:

$$k_i = k_{20} f_i / 20, \quad (10)$$

где  $k_i$  – значение коэффициента при другой частоте колебаний катода-инструмента,  $k_{20}$  – значение коэффициента при частоте 20 Гц,  $f_i$  – требуемое значение частоты колебаний катода-инструмента.

Таблица 2

#### Параметры обработки

| № пп | Частота колебаний, Гц | Напряжение среднее, В | Ток средний, А | Амплитуда, мм | Коэффициент $k$ (7) |
|------|-----------------------|-----------------------|----------------|---------------|---------------------|
| 1    | 20                    | 11,5                  | 10             | 0,8           | 10                  |

|   |    |      |    |     |    |
|---|----|------|----|-----|----|
| 2 | 50 | 11,5 | 11 | 0,7 | 25 |
| 3 | 80 | 11,5 | 12 | 0,6 | 40 |

Таблица 3

## Результаты расчётов и измерений шероховатости поверхностей

| №<br>пп | Расчётное значение $R_a$ , мкм |          | Измеренное значение $R_a$ , мкм |          |
|---------|--------------------------------|----------|---------------------------------|----------|
|         | боковая                        | торцевая | боковая                         | торцевая |
| 1       | 0,11                           | 2,6      | 0,15                            | 2,8      |
| 2       | 0,33                           | 6,3      | 0,4                             | 6,3      |
| 3       | 0,78                           | 7,1      | 0,8                             | 7,4      |

**Заключение**

Изменение частоты колебаний катода-инструмента приводит к изменению шероховатости обрабатываемых поверхностей. При уменьшении частоты колебаний инструмента улучшается качество обрабатываемой поверхности, так как увеличивается время электрохимической обработки. Расчётные значения параметров  $R_a$  практически совпадают с измеренными, что подтверждает правильность выбранных формул, коэффициентов и показателей степеней.

**Библиографические ссылки**

1. Основоположники электрических методов и технологий обработки материалов : моногр. / под науч. ред. Б. П. Саушкина. М., 2020. 226 с.
2. Саушкин Б. П. Комбинированные методы обработки в машиностроительном производстве // Металлообработка. 2003. № 1. С. 8–17.
3. Смоленцев Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М. : Машиностроение, 2005. 511 с.
4. Электрохимическая размерная обработка металлов : сб. ст. Кишинев, 1974. 143 с.
5. Размерная электрохимическая обработка деталей машин : материалы IV Всесоюз. конф. / под общ. ред. проф., д-ра техн. наук Ф. В. Седыкина; Тула. Тульск. политехн. ин-т. 1975. Ч. 1: Основы теории процесса. 310 с.
6. Смоленцев Е. В. Проектирование технологического процесса электроэрозионно-химической обработки // Металлообработка. 2008. № 6. С. 34–39.
7. Болдырев А. И. Комбинированная электрохимикомеханическая обработка деталей авиационно-космической техники. // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2011. Т. 13, № 1(2). С. 293–296.
8. Волков В. И., Румянцев Е. М., Невский О. И. Влияние состава электролита на параметры эрозионноэлектрохимической обработки сплава ВТ3 – 1 // Комбинированные электроэрозионно-электрохимические методы размерной обработки металлов : тез. докл. Всесоюз. науч.-технич. конф. Уфа, 1983. С. 7–10.
9. Зайцев А. Н., Журавский А. К., Полянин В. И. Особенности математического описания процесса электрохимического формообразования боковой поверхности при электроэрозионно-электрохимической прошивке малых отверстий // Размерная электрохимическая обработка деталей машин. ЭХО-80 : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Тула, 1980. С. 371–375.
10. Бородулин В. А., Волков В. И. Особенности эрозионноэлектрохимической прошивки отверстий глубиной свыше 10 мм // Комбинированные электроэрозионноэлектрохимические методы размерной обработки металлов : тез. докл. Всесоюз. науч. техн. конф. Уфа, 1983. С. 50–53.
11. Патент РФ № 2428287. Способ электро-контактно-эрозионно-химической обработки / Шестаков И. Я. ; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25.
12. Шестаков И. Я., Стрюк А. И., Безъязыков С. А. Физические эффекты и явления при электрообработке в гармонически изменяющемся межэлектродном зазоре // Материалы, технологии, конструкции : сб. тр. Красноярск: САА, 1995. С. 88–92.

13. Шестаков И. Я., Рубанов С. В. Исследование электроконтактной обработки при вибрации электрода-инструмента // *Материалы, технологии, конструкции* : сб. тр. Красноярск : САА, 1996. С. 28–32.
14. Шестаков И. Я., Стрюк А. И., Миленин В. Н. Электрoконтактное прошивание заклёпок // *Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика* : сб. тр. 2003. Вып. 9. С. 81–84.
15. Шестаков И. Я., Стрюк А. И., Цуканов А. В. Импульсная электрообработка вибрирующим электродом-инструментом. // *Вестник СибГАУ*. 2004. № 5. С. 253–258.
16. Шестаков И. Я., Артюкова О. Е. Электроконтактнохимическая обработка вибрирующим электродом-инструментом // *Решетневские чтения : материалы XIV Междунар. науч. конф.* 10 – 12 ноября. Красноярск, 2010. С. 344–346.
17. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. / А. М. Дальский, А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, А. Г. Суслов. М. : Машиностроение -1, 2003. Т. 2. 943 с.
18. Фотеев Н. К. Технология электроэрозионной обработки. М. : Машиностроение. 1980. 184 с.
19. Коваленко В. С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Киев: Вище школа. 1975. 236 с.
20. Крымов В. В., Елисеев Ю. С., Зудин К. И. Производство лопаток газотурбинных двигателей. М. : Машиностроение-Полет. 2002. 375 с.

## References

1. Saushkin B. P. *Osnovopolozhniki elektricheskikh metodov i tekhnologii obrabotki materialov* [Founders of electrical methods and materials processing technologies]. Moscow, 2020, 226 p.
2. Saushkin B. P. [Combined processing methods in mechanical engineering]. *MetallООbrabotka*. 2003, No. 1, P. 8–17 (In Russ.).
3. Smolentsev E. V. *Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki* [Design of electrical and combined processing methods]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2005, 511 p.
4. Petrov Yu. N. *Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka metallov* [Electrochemical dimensional processing of metals]. Kishinev, 1974, 143 p.
5. *Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin: Materialy IV Vsesoyuz. konf.* [Dimensional electrochemical processing of machine parts: Materials of the IV All-Union. conf.]. Ed. F. V. Sedykin. Tula, 1975, Vol. 1, 310 p. (In Russ.).
6. Smolentsev E. V. [Design of the technological process of electroerosive chemical machining]. *MetallООbrabotka*. 2008, No. 6, P. 34–39 (In Russ.).
7. Boldyrev A. I. [Combined electrochemical-mechanical processing of aerospace equipment parts]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2011. Vol. 13, No. 1(2), P. 293–296 (In Russ.).
8. Volkov V. I., Rumyantsev E. M., Nevsky O. I. [Influence of electrolyte composition on the parameters of erosion-electrochemical treatment of the VT3 – 1 alloy]. *Tezisy dokl. Vsesoyuznoi nauchno-tekhnich. konf. "Kombinirovannyye elektroerozionnoelektrokhimicheskie metody razmernoi obrabotki metallov"*. [Abstracts of the report of the All-Union scientific and technical conference "Combined electrical discharge and electrochemical methods of dimensional processing of metals"]. Ufa, 1983, P. 7–10 (In Russ.).
9. Zaitsev A. N., Zhuravskii A. K., Polyanin V. I. [Features of the mathematical description of the process of electrochemical shaping of the side surface during electroerosive-electrochemical piercing of small holes] *Tezisy dokl. Vsesoyuznoi nauchno-tekhn. konf. "Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin. EKhO-80"*. [Abstracts of the report of the All-Union scientific and technical conf. "Dimensional electrochemical processing of machine parts. ECM-80"]. Tula, 1980, P. 371–375 (In Russ.).

10. Borodulin V. A., Volkov V. I. [Features of erosion-electrochemical piercing of holes with a depth of more than 10 mm]. *Tezisy докладov Vsesoyuzn. nauch. tekhn. konferentsii. "Kombinirovannye elektroerozionnoelektrokhimicheskie metody razmernoi obrabotki metallov"* [Abstracts of reports of the All-Union. scientific tech. conferences "Combined electro-erosion-electrochemical methods of dimensional processing of metals"]. Ufa, 1983, P. 50–53 (In Russ.).
11. Shestakov I. Ya. *Sposob elektro-kontaktno-erozionno-khimicheskoi obrabotki* [Method of electro-contact erosion-chemical processing]. Patent RF, No. 2428287, 2011.
12. Shestakov I. Ya., Stryuk A. I., Bezyazykov S. A. [Physical effects and phenomena during electrical processing in a harmonically varying interelectrode gap]. *Materialy, tekhnologii, konstruksii*. Krasnoyarsk, 1995, P. 88–92.
13. Shestakov I. Ya., Rubanov S. V. [Study of electrical contact processing with vibration of the electrode-tool]. *Materialy, tekhnologii, konstruksii*. Krasnoyarsk, 1996, P. 28–32.
14. Shestakov I. Ya., Stryuk A. I., Milenin V. N. [Electric contact stitching of rivets]. *Perspektivnye materialy, tekhnologii, konstruksii, ekonomika*. 2003, Vol. 9, P. 81–84 (In Russ.).
15. Shestakov I. Ya., Stryuk A. I., Tsukanov A. V. [Pulse electrical treatment with a vibrating electrode-tool]. *Vestnik SibGAU*. 2004, No. 5, P. 253–258 (In Russ.).
16. Shestakov I. Ya., Artyukova O. E. [Electrocontact-chemical processing with a vibrating electrode-tool] *Materialy XIV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XIV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2010, P. 344–346 (In Russ.).
17. Dal'skii A. M., Kosilova A. G., Meshcheryakov R. K., Suslov A. G. *Spravochnik tekhnologamashinostroitelya : v 2-kh t* [Handbook of a mechanical engineer: in 2 volumes]. Moscow, Mashinostroenie-I Publ., 2003, Vol. 2, 943 p.
18. Foteev N. K. *Tekhnologiya elektroerozionnoi obrabotki* [Electric discharge machining technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 184 p.
19. Kovalenko V. S. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov* [Electrophysical and electrochemical methods of materials processing]. Kyiv, Vishcheschool Publ., 1975, 236 p.
20. Krymov V. V., Eliseev Yu. S., Zudin K. I. *Proizvodstvo lopatok gazoturbinnnykh dvigatelei* [Production of gas turbine engine blades]. Moscow Mashinostroenie-Polet Publ., 2002, 375 p.

© Шестаков И. Я., Семенова Л. А., Шестаков В. И.,  
Швалёва Н. А., Ремизов И. А., 2024

---

**Шестаков Иван Яковлевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электронной техники и телекоммуникаций; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: yakovlevish@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7759-5159>

**Семенова Лилия Александровна** – доцент кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: semenova@mail.sibsau.ru. <https://orcid.org/0009-0005-3947-3408>

**Шестаков Владислав Иванович** – аспирант кафедры технического регулирования и метрологии; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: pn3vm4t@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-8564-0551>

**Швалёва Наталья Александровна** – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: natalyashvaleva@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1031-3153>

**Ремизов Игорь Анатольевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, Сибирский федеральный университет; доцент, Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого. E-mail: 2remizov@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6980-0167>

**Shestakov Ivan Yakovlevich** – Dr. Sc., associate professor, Professor of the Department of Electronic Engineering and Telecommunications; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: yakovlevish@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7759-5159>

**Semenova Liliya Aleksandrovna** – Associate Professor of the Department of Aircraft; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: semenova@mail.sibsau.ru. <https://orcid.org/0009-0005-3947-3408>

**Shestakov Vladislav Ivanovich** – postgraduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pn3vm4t@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-8564-055>

**Shvaleva Natalya Aleksandrovna** – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: natalyashvaleva@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1031-3153>

**Remizov Igor Anatolyevich** – Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University; associate professor, Prof. V. F. Voyno-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University. E-mail: 2remizov@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6980-0167>

---

Статья поступила в редакцию 19.09.2024; принята к публикации 14.11.2024; опубликована 26.12.2024  
The article was submitted 19.09.2024; accepted for publication 14.11.2024; published 26.12.2024

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Файлы со статьями принимаются по электронной почте [vestnik@sibsau.ru](mailto:vestnik@sibsau.ru).

**Электронная копия.** Статья набирается в программе Microsoft Office Word 2003 (**расширение имени файла DOC!**)

**Объем статьи:** 5–20 страниц (включая рисунки, таблицы и библиографические ссылки), краткое сообщение – 4–5 страниц, обзорная статья – до 20 страниц.

**Параметры страницы.** Формат А4 (210×297). Поля: правое и левое – 2 см, верхнее и нижнее – 2,5 см.

**Текст.** Шрифт Times New Roman 11. Подзаголовки: шрифт Times New Roman 11 bold.

**Межстрочный интервал** – одинарный, межбуквенный и междусловный интервал – нормальный, перенос слов не допускается.

**Абзацный отступ** равен 0,5 см.

Не допускается (!) набирать тексты прописными (заглавными) буквами и жирным шрифтом (кроме названия), а также размещать все указанные элементы в рамках и имитировать оформления набора, выполняемого в журнале.

Статья должна содержать предмет, тему, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Страницы не нумеруются.

### СТРУКТУРА СТАТЬИ:

**1. Индекс УДК** предшествует названию статьи, соответствует заявленной теме и проставляется в верхнем левом углу листа.

**2. Название статьи:** не более 15 слов. Аббревиатуры и сокращения в названии не допускаются.

**3. Авторы.** Инициалы и фамилия. Количество авторов одной статьи не более пяти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй в соавторстве.

**4. Аффiliation автора при публикации:** название и адрес организации, а также электронная почта автора-корреспондента. Если авторов несколько, у каждой фамилии и соответствующей организации проставляется цифровой верхний индекс. Если все авторы статьи работают в одной организации, она указывается один раз.

**5. Аннотация:** минимум 230–250 слов (следует ориентироваться на объем англоязычной аннотации). Структура аннотации: цель исследования, методы, результаты, заключение. Курсивом.

**6. Ключевые слова:** не более 5–7 слов или словосочетаний. Курсивом.

**7. Название статьи** на английском языке.

**8. Авторы** на английском языке.

**9. Аффiliation автора** на английском языке.

**10. Аннотация** на английском языке.

**11. Ключевые слова** (Keywords) на английском языке.

**12. Основной текст** строится по следующей схеме и содержит обязательные подзаголовки:

– **Введение.**

– **Тематические подзаголовки** по основной части текста.

– **Заключение.**

**13. Благодарности** (если есть указание на источники финансирования, гранты).

**14. Acknowledgements** (Благодарности дублируются на английском языке).

**15. Библиографические ссылки.** Библиографические ссылки должны содержать не менее 15 источников! Библиографические ссылки оформляются на русском языке по ГОСТ Р 7.0.5–2008. Ссылки на источники расставляются по тексту в квадратных скобках в порядке нумерации по мере цитирования.

**16. References.** Библиографические ссылки в романском алфавите оформляются по требованиям, представленным на сайте. Используется система транслитерации BGN ([translit.net](http://translit.net))

**17. Сведения об авторах на русском и английском языках.** В сведениях указывается Ф.И.О. автора, ученая степень, ученое звание, должность, название организации. Например:

**Иванов Иван Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: [sen@sibsau.ru](mailto:sen@sibsau.ru).

**Ivanov Ivan Ivanovich** – Dr. Sc, Professor, Head of the Department; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: [sen@sibsau.ru](mailto:sen@sibsau.ru).

