

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

## DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Том 15

№ 3

Vol. 15

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

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

---

**Том 15**

**№ 3**

**2024**

---

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*Гусев О.К., д.т.н., профессор, проректор Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)*

## ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

*Маляревич А.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)*

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Алексеев В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Физика и оптотехника» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашиникова (г. Ижевск, Россия)*

*Анищик В.М., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики твёрдого тела и нанотехнологий Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)*

*Бубулис А., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Научного центра мехатроники Каунасского технологического университета (г. Каунас, Литва)*

*Вайн А.А., д.т.н., профессор Тартуского университета (г. Тарту, Эстония)*

*Виба Я., член-корреспондент Латвийской академии наук, д.т.н., профессор, Институт механики и машиностроения Рижского технического университета (г. Рига, Латвия)*

*Гуттен М., д.т.н., заведующий кафедрой метрологии и прикладной электротехники Жилинского университета (г. Жилина, Словакия)*

*Дмитриев С.М., д.т.н., профессор, ректор Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Россия)*

*Дэнилак С., профессор Производственно-исследовательского центра Технологического института штата Джорджия (г. Атланта, США)*

*Жарин А.Л., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)*

*Жуковский П., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических аппаратов и техники высоких напряжений Люблинского технического университета (г. Люблин, Польша)*

*Колтунович Т.Н., д.т.н., профессор, Люблинский технический университет (г. Люблин, Польша)*

---

**Комаров Ф.Ф.**, академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией элионики Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

**Кучинский П.В.**, д.ф.-м.н., доцент, директор Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

**Кэмп А.**, профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания)

**Матеос Х.**, к.ф.-м.н., доцент, университет Ровира и Вирхилий (г. Таррагона, Испания)

**Пилипенко В.А.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)

**Плескачевский Ю.М.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор (г. Минск, Беларусь)

**Распопов В.Я.**, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Приборы управления» Тульского государственного университета (г. Тула, Россия)

**Це Ли**, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)

**Чижик С.А.**, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, заведующий кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

**Шкадаревич А.П.**, академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)

**Юмашев К.В.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

---

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 25 июня 2010 г.

Регистрационный номер 1372

В соответствии с решением ВАК от 08.07.2011 г. №13/1 журнал включён в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований;

научное направление: **технические (приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; электроника; физика); физико-математические (приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; электроника; физика)** (приказ ВАК Республики Беларусь от 06.02.2024 № 30 с изменениями от 23.05.2024 № 124)

Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь».

Подписные индексы – 74835; 748352.

Ведущий научный редактор: Шахлевич Л.Н.

Технический редактор: Чабарова О.Л.

Набор и верстка выполнены в редакции журнала «Приборы и методы измерений».

Подписано в печать .2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 8,25. Уч.-изд. л. 6,52. Тираж 40 экз.

Дата выхода в свет .2024. Заказ № .

Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.

Пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск

---

#### АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, корп. 17, комн. 432,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь,  
тел.: +375 (17) 293 96 67, факс: +375 (17) 292 67 94  
e-mail: [pimi@bntu.by](mailto:pimi@bntu.by)  
<http://pimi.bntu.by>

# DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder  
Belarusian National Technical University

Issued four times a year

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

---

**Volume 15**

**№ 3**

**2024**

---

## EDITOR-IN-CHIEF

**Oleg K. Gusev**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

## DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

**Aliaksandr M. Malyarevich**, *Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

## EDITORIAL BOARD

**Vladimir A. Alekseev**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Physics and Optical Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russia)*

**Victor M. Anishchik**, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Solid State Physics and Nanotechnology, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

**Algimantas Bubulis**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Kaunas University of Technology (Kaunas, Lithuania)*

**Arvid A. Vain**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, University of Tartu (Tartu, Estonia)*

**Janis Viba**, *Corresponding Member of the Latvian Academy of Sciences, Doctor of Science (Engineering), Professor, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Riga Technical University (Riga, Latvia)*

**Miroslav Gutten**, *Doctor of Science (Engineering), Head of Department of Metrology and Applied Electrical Engineering, University of Žilina (Žilina, Slovakia)*

**Sergei M. Dmitriev**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Rector of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (Nizhny Novgorod, Russia)*

**Steven Danyluk**, *PhD, Professor, Production and Research Center, Georgia Institute of Technology (Atlanta, USA)*

**Anatoly L. Zharin**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

**Pawel Żukowski**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department of Electrical Devices and High Voltages Technology, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)*

**Tomasz N. Koltunowicz**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)*

---

**Fadey F. Komarov**, *Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Elionics Laboratory, A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

**Petr V. Kuchynski**, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Director of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

**Alan Kemp**, *PhD, Professor, Institute of Photonics, University of Strathclyde (Glasgow, United Kingdom)*

**Xavier Mateos**, *PhD, Associate Professor, Rovira i Virgili University (Tarragona, Spain)*

**Vladimir A. Pilipenko**, *Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of the State Center “Belmicroanalysis” of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (Minsk, Belarus)*

**Yuriy M. Pleskachevsky**, *Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor (Minsk, Belarus)*

**Vladimir Ya. Raspopov**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Control Devices Department, Tula State University (Tula, Russia)*

**Tse Li**, *Deputy Director of Northeast Scientific Research Institute of Sensor Technology (Harbin, China)*

**Sergei A. Chizhik**, *Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Engineering), the First Vice Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Head of Micro- and Nanotechnics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

**Alexey P. Shkadarevich**, *Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Scientific and Technical Center “LEMT” of the BelOMO (Minsk, Belarus)*

**Konstantin V. Yumashev**, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Experimental and Theoretical Physics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

---

**ADDRESS:**

Belarusian National Technical University  
Nezavisimosty Ave., 65, Building 17, Room 432  
Minsk 220013, Belarus  
Tel.: +375 (17) 293 96 67, fax: +375 (17) 292 67 94  
e-mail: [pimi@bntu.by](mailto:pimi@bntu.by)  
<http://pimi.bntu.by>

## СОДЕРЖАНИЕ

### Средства измерений

<i>Амит К. Мишра, Дипак П. Патил</i> Обзор автомобильных КВ антенн с функцией NVIS-связи (in English).....	161
<i>О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский</i> Измерительный преобразователь напряжения произвольной формы для широкополосного вольтметра переменного тока.....	174
<i>А.В. Казак, Л.В. Симончик</i> Аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ».....	186

### Методы измерений, контроля, диагностики

<i>В.В. Матвеев, М.Г. Погорелов, А.Н. Хомячкова</i> Модифицированный метод TRIAD для решения задачи ориентации подвижного объекта....	195
<i>А.И. Калугин, Д.Н. Кочурова, Е.А. Антонов, М.Ю. Альес</i> Экспериментальная проверка модели эффективной площади отражения сложных объектов в гауссовом лазерном пучке (in English).....	205
<i>О.В. Муравьева, А.В. Блинова, Л.А. Денисов, О.П. Богдан</i> Особенности распространения акустических нормальных волн в тонких пористых листах терморасширенного графита.....	213
<i>А.Ю. Кутепов, А.П. Крень, А.В. Никифоров, Н.К. Турсунов</i> Применение технологий искусственного интеллекта для оперативной диагностики механических характеристик чугуна.....	231
<i>Ю.Э. Самошкина, А.В. Черниченко</i> Магнитный круговой дихроизм оксидных плёнок: изучение электронных, магнитных и зарядовых состояний.....	240
<i>Р.В. Бударагин, З.Ю. Саласенко, А.Д. Серов, И.А. Цветкова</i> Калориметрические измерения ВЧ-сигнала большой мощности.....	248

## CONTENTS

### Measuring Instruments

<i>Amit K. Mishra, Dipak P. Patil</i> <b>Review on HF Band Vehicular Antenna with NVIS Communication</b> .....	161
<i>O.V. Dvornikov, U.N. Bakhur, A.G. Bakhir, U.M. Lazouski, V.A. Tchekhovski</i> <b>Arbitrary Waveform Voltage Measuring Converter for Wideband AC Voltmeter (in Russian)</b> .....	174
<i>A.V. Kazak, L.V. Simonchik</i> <b>Air Plasma Jet Generation Apparatus "ALOE" (in Russian)</b> .....	186

### Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

<i>V.V. Matveev, M.G. Pogorelov, A.N. Khomyachkova</i> <b>Modified TRIAD Method for Solving the Problem of a Moving Object Orientation (in Russian)</b>	195
<i>A.I. Kalugin, D.N. Kochurova, E.A. Antonov, M.Yu. Alies</i> <b>Experimental Verification of Laser Radar Cross Section Model for Complex Targets with Gaussian Beam Irradiation</b> .....	205
<i>O.V. Muravieva, A.V. Blinova, L.A. Denisov, O.P. Bogdan</i> <b>The Peculiarities of Acoustic Normal Waves Propagation in Thin Porous Sheets of Thermally Expanded Graphite (in Russian)</b> .....	213
<i>A. Kutsepau, A. Kren, A. Nikiforov, N. Tursunov</i> <b>Application of Artificial Intelligence Technology for Prompt Diagnosis of Cast Iron Mechanical Properties (in Russian)</b> .....	231
<i>Yu. Samoshkina, A. Chernichenko</i> <b>Magnetic Circular Dichroism of Oxide Films: Study of Electronic, Magnetic and Charge States (in Russian)</b> .....	240
<i>R.V. Budaragin, Z.IU. Salasenko, A.D. Serov, I.A. Tsvetkova</i> <b>Calorimetric Measurements of a High-Power RF Signal (in Russian)</b> .....	248

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-161-173

# Review on HF Band Vehicular Antenna with NVIS Communication

Amit K. Mishra<sup>1,2</sup>, Dipak P. Patil<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sandip Institute of Technology and Research Centre,  
Trimbak Road, Nashik, Maharashtra, 422213, India

<sup>2</sup>Sandip Institute of Engineering and Management,  
Trimbak Road, Nashik, Maharashtra, 422213, India

Received 25.06.2024

Accepted for publication 04.09.2024

## Abstract

Antennas play a fundamental role in modern communication systems by facilitating signal transmission and reception across various frequency bands. Each antenna is designed for specific applications based on its operating frequency range. Whether deployed for Car-to-Car Communication or military operations, antennas serve critical functions, with information security being paramount in military contexts. Vehicular antennas typically operate within the L Band, approximately 1 to 2 GHz, relying on satellites for signal communication. However, traditional transmission through the ionosphere faces limitations, notably the skip zone, where signal reception is hindered, leading to communication failures. To address this limitation, Near Vertical Incident Skywave (NVIS) communication has been developed. NVIS utilizes antennas with very high ( $>75^\circ$ ) radiation angles and low HF frequencies to overcome skip zone challenges. Despite existing research efforts, achieving high radiation efficiency remains a challenge, often due to improper antenna angle settings. Additionally, previous studies have overlooked the importance of narrow beam focusing, crucial for long-range communication and direction finding. This paper aims to enhance antenna performance parameters such as efficiency and gain through the adoption of specific techniques. By optimizing antenna design and configuration, we aim to improve performance for ionospheric communication, particularly in military applications involving data and voice transmission.

**Keywords:** military communication, NVIS communication, vehicular antennas

---

### Адрес для переписки:

Дипак П. Патил  
Институт инженерии и менеджмента имени Сандипа,  
Тримбак-роуд, Насик, 422213, Индия  
e-mail: dipakpatil25@gmail.com

### Address for correspondence:

Dipak P. Patil  
Sandip Institute of Engineering and Management,  
Trimbak Road, Nashik, Maharashtra, 422213, India  
e-mail: dipakpatil25@gmail.com

---

### Для цитирования:

Amit K. Mishra, Dipak P. Patil.  
Review on HF Band Vehicular Antenna with NVIS Communication.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 161–173.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-161-173

### For citation:

Amit K. Mishra, Dipak P. Patil.  
Review on HF Band Vehicular Antenna with NVIS Communication.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):161–173.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-161-173

---

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-161-173

## Обзор автомобильных КВ антенн с функцией NVIS-связи

Амит К. Мишра<sup>1,2</sup>, Дипак П. Патил<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт технологий и исследовательский центр имени Сандипа,  
Тримбак-роуд, Насик, 422213, Индия

<sup>2</sup>Институт инженерии и менеджмента имени Сандипа,  
Тримбак-роуд, Насик, 422213, Индия

Поступила 25.06.2024

Принята к печати 04.09.2024

Антенны играют основополагающую роль в современных системах связи, обеспечивая передачу и приём сигналов в различных частотных диапазонах. Каждая антенна разрабатывается для решения конкретных задач в зависимости от её рабочего диапазона частот. Независимо от того, используются ли они для связи между автомобилями или управления боевыми действиями, антенны выполняют критически важные функции, при этом первостепенное значение для военных применений приобретают соображения информационной безопасности. Автомобильные антенны обычно работают в диапазоне  $L$ , приблизительно от 1 до 2 ГГц, передавая сигнал через спутники. Однако традиционная передача сигнала через ионосферу связана с рядом ограничений, в частности, с наличием мёртвой зоны, приём сигнала в которой затруднён, что приводит к потере связи. Для борьбы с этим ограничением был предложен метод околоразличного падения ионосферной волны, или NVIS (Near Vertical Incident Skywave). В методе NVIS используются антенны с очень большими ( $>75^\circ$ ) углами излучения и низкие частоты КВ диапазона, что позволяет преодолеть проблему мёртвой зоны. Несмотря на предпринимаемые исследователями усилия, достижение высокой эффективности излучения остаётся проблемой, часто из-за неверного выбора угла антенны. Кроме того, в предшествующих исследованиях не уделялось должного внимания проблеме фокусировки узкого луча, имеющей критическое значение для дальней связи и пеленгации. Целью данной статьи является улучшение таких характеристик антенн, как эффективность и коэффициент усиления, путём использования специальной методики. Оптимизация конструкции и конфигурации антенн направлена на улучшение характеристик ионосферной связи, в частности, для военных применений, связанных с передачей данных и речи.

**Ключевые слова:** военная связь, связь NVIS, автомобильные антенны

---

**Адрес для переписки:**

Дипак П. Патил  
Институт инженерии и менеджмента имени Сандипа,  
Тримбак-роуд, Насик, 422213, Индия  
e-mail: dipakpatil25@gmail.com

**Address for correspondence:**

Dipak P. Patil  
Sandip Institute of Engineering and Management,  
Trimbak Road, Nashik, Maharashtra, 422213, India  
e-mail: dipakpatil25@gmail.com

---

**Для цитирования:**

Amit K. Mishra, Dipak P. Patil.  
Review on HF Band Vehicular Antenna with NVIS Communication.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 161–173.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-161-173

**For citation:**

Amit K. Mishra, Dipak P. Patil.  
Review on HF Band Vehicular Antenna with NVIS Communication.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):161–173.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-161-173

## 1. Introduction

Vehicular antennas play a crucial role in various communication systems, including car-to-car communication, military vehicles, aircraft, and ships [1]. While these antennas can be designed for the UHF range, using satellite communication raises concerns about data security due to the involvement of different agencies handling the satellite and its data. To overcome this limitation, the high-frequency (HF) band [2, 3] presents a viable alternative.

In the HF band, antenna signals are reflected from the ionosphere. However, this approach has several disadvantages, such as the presence of a skip zone, height limitations for the antenna, multipath fading, and higher power requirements. To address these challenges, the near vertical incidence skywave (NVIS) technique [3, 4, 5] is implemented. NVIS communication differs from traditional HF antennas in the following ways:

- NVIS antennas are designed for high radiation angles ( $>75^\circ$ ) to maximize skywave propagation.
- An antenna tuning unit (ATU) is used to optimize the antenna's performance.

Furthermore, various NVIS antenna types exist, including dipoles, inverted vees, and unbalanced wires. Among these, unbalanced wire antennas and inverted L-antennas are preferred for vehicle applications due to their ability to radiate along the entire length of the wire when connected at the end at 50 ohms microstrip field line [6].

Antennas play a vital role in our daily lives, enabling signal transmission and reception across various frequency bands. Some of the measures applications where antenna used such as, military applications, information security and wireless devices. Designing antennas in the HF range allows signal transmission and reception through the ionosphere, eliminating the need for satellites and ensuring data security. NVIS communication enables coverage of nearby regions by transmitting signals through the skywave with a high radiation angle ( $>75^\circ$ ), effectively reducing the skip zone. NVIS offers several advantages, including data and voice communication capabilities, as well as support for disaster relief and military operations [7].

However, the currently available HF band vehicular antennas suffer from limitations such as poor radiation efficiency, resulting in low gain values (less than -20 dBi) and a narrow bandwidth of 24 kHz. The objective of this research is to design HF band

vehicular antennas with enhanced parameters, including improved efficiency, gain (better than -20 dBi), and the inclusion of NVIS for nearby region coverage. Additionally, the research focuses on achieving unidirectionality in the antenna by maintaining a high directivity value, which can be accomplished by increasing the effective aperture.

There are several simulated software available for implementation of this project. For example, numerical electromagnetics code (NEC2), computer simulation technology (CST), and high frequency structure simulator (HFSS). Among these HFSS is widely preferred. HFSS uses adaptive meshing, the Finite Element Method (FEM), and stunning graphics to provide you with unmatched performance and understanding for all of your 3D EM challenges. S-Parameters, Resonant Frequency, and Fields are among the parameters that may be calculated using HFSS.

Progression of the manuscript flow discussed in the following manners: Section II of this paper presents a literature survey, furthermore, in section III explains wave propagation and NVIS. Moreover, in section IV highlights the challenges and scope of the proposed work, and in section V focuses on the design and analysis of the presented work for HF band vehicular antennas. Finally, in section VI illustrates the conclusion of the proposed work.

## 2. Literature review

This section presents a review of the existing literature related to HF band vehicular antennas and NVIS communication. In this sections we highlighted the key contributions, limitations, and gaps that motivate the current research.

### 2.1. HF band vehicular antennas

In [2], the authors designed an inverted L antenna for vehicular HF communications. This antenna achieved a gain of -24 dBi and a bandwidth of 24 kHz. The study suggests that reducing the quality factor (Q) can increase the bandwidth, while an offset feed can enhance the gain. However, the achieved gain and bandwidth values are relatively low, indicating the need for further improvements.

Authors in [8], proposes an antenna with a higher gain of -18.1 dBi by using two radiating elements that function as parallel capacitors.

The inclusion of a high-core inductor further enhances the gain to -17.9 dBi. The study also investigates the use of capacitive loading to reduce antenna height and improve bandwidth, as well as the incorporation of chip inductors to reduce antenna size. However, the authors emphasize the importance of using high-Q chip inductors and capacitors to maintain good radiation efficiency.

Authors in [9], have implemented HF Band vehicular antenna with NVIS. This antenna achieved the -10 dB frequency between 3 to 10 MHz to reach a wide range of 200 KM. NVIS is utilized for communication in places without a telecommunications infrastructure or in places where a major disaster, like the flooding in New Orleans in 2005, destroys the infrastructure that already exists. Again Authors in [9], have presented a NVIS study carried out in Netherlands.

Table 1

**Comparison of various paper studied on HF band vehicular antenna**

Methodology	Main findings	Limitations
The methodology involves the development of an HF loop antenna for two-way communications up to 300 km, contrasting it with traditional methods and considering the limitations of NVIS propagation [10]	The development of an HF loop antenna allows for two-way, i. e. Tx. and Rx. communication up to 300 km, with NVIS propagation being crucial and limited to the frequency band of 1.5 MHz to 12 MHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The study is limited to the frequency band of interest between 1.5 MHz and 12 MHz due to the dependence of NVIS propagation on the ionosphere.</li> <li>• The study does not explore other frequency bands outside the range of 1.5 MHz to 12 MHz.</li> <li>• The study does not address potential challenges or limitations of using the HF loop antenna in different environmental conditions or geographical locations</li> </ul>
The methodology involved designing low-profile, wide-band, high-frequency antennas for military vehicles, fabricating a full-scale prototype, and conducting stand-alone measurements and tests with an experimental WB HF radio to validate the design approach [11]	The design of low-profile, wide-band, high-frequency antennas for military vehicles was successful in meeting performance requirements while maintaining a compact profile. A full-scale prototype was created and tested with a military vehicle, confirming the expected impedance behavior and validating the design approach. The antenna demonstrated flexibility in adapting to various communication conditions due to its diverse operation modes	Design challenges related to small electrical size and mounting constraints, challenges in the diverse environment in the near field. No explicit mention of limitations or suggestions for further research
The methodology involved identifying the factors contributing to rotor modulation and proposing the use of specific antennas to address the issue [12]	Antennas mounted on helicopters for HF NVIS communication face severe rotor modulation near resonant frequencies. The use of two towel-bar antennas can help reduce the drop in gain caused by hub currents. Despite the improvement in gain due to the antennas, the variation in gain caused by parasitic radiation from the rotor blades persists	Limited scope to helicopters with tandem main rotors, proposed solution only addresses drop in gain due to hub currents, no validation of solution in real-world scenarios

<p>The methodology involves examining operational requirements, determining necessary antenna characteristics, and reviewing simple antenna designs for suitability in lightweight transportable systems [13]</p>	<p>HF radio is increasingly used for short and medium-distance communications, especially for mobile or transportable stations. The paper aims to determine the characteristics suitable antennas must provide for these communications. Simple antenna designs are reviewed for their suitability in lightweight transportable systems</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lack of familiarity of engineers with the exact characteristics needed for antennas in HF radio communications.</li> <li>• The need to determine the characteristics that suitable antennas must provide</li> </ul>
<p>The methodology involved applying characteristic mode analysis to vehicular antennas, focusing on exciting horizontal electric dipole current distribution and using edge port excitation to achieve bandwidth improvements [14]</p>	<p>Low-profile vehicular antennas in the NVIS frequency range are inefficient and narrowband due to their small size. The widest bandwidth is obtained by exciting the horizontal electric dipole current distribution on the vehicle. Achieving a bandwidth of 24 kHz above realistic grounds comes with the trade-off of very low gain at 2 MHz</p>	<p>Study limited to NVIS frequency range Trade-off between bandwidth and gain</p>
<p>The methodology involved using the Numerical Electromagnetics Code (NEC) antenna modeling program to obtain and analyze data on the performance, current distributions, and radiation patterns of high-frequency (HF) tactical generic antennas [15]</p>	<p>The main findings include the performance characteristics of different high-frequency tactical antennas such as groundwave communication, NVIS performance, and suitability for different ranges of communication</p>	<p>Limited generalizability to other antenna types, lack of discussion on performance in different environmental conditions, absence of comparison with other antenna models, no mention of limitations of the NEC antenna modeling program</p>
<p>The methodology involved optimizing an antenna for NVIS applications on a vehicle, focusing on a vertically orientated loop configuration, capacitive loading effects, and developing a transmission line model for design [16]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NVIS antennas for vehicle mounting have limited development scope due to size constraints at typical frequencies.</li> <li>- Vertically orientated loop antennas are confirmed to be the most effective configuration.</li> <li>- Capacitive loading of the loop has a desirable effect on current distribution and energy radiation towards the zenith</li> </ul>	<p>Limited scope for development within typical NVIS frequencies and vehicle sizes. Focus on a specific vehicle size may limit generalizability</p>

## 2.2. NVIS antennas

In [4], the authors designed electrically small antennas for NVIS communications, achieving a gain of -18.1 dBi by utilizing two radiating elements as parallel capacitors and incorporating high-Q air-core inductors. Similar to [8], capacitive loading

is employed to reduce antenna height and improve bandwidth, while chip inductors are used in printed monopole antennas to reduce size [17]. The study highlights the importance of using high-Q chip inductors and capacitors to maintain good radiation efficiency. The work in [5] focuses on designing an array of antennas for near vertical-incidence

Skywave (NVIS) communication. The authors report an increase in efficiency by 1 dB and a gain increase of 3 dB for a two-dipole array, while a four-dipole array achieves optimized directivity (efficiency between 2.6 dB to 3 dB,  $D = 0.2$  dB, and gain = 2.8 dB to 3 dB). The study suggests that elevating the antenna's height or operating frequency can significantly improve efficiency. Research conducted in the Netherlands [9] explores the performance of horizontal dipole antennas above ground for NVIS applications [18, 19, 20], considering antenna heights between  $0.18\lambda$  and  $0.22\lambda$ .

While the existing literature provides valuable insights into HF band [21] vehicular antennas and NVIS communication [22, 23], there is still a need for further improvements in terms of radiation efficiency, gain, bandwidth, and unidirectionality. Additionally, the integration of NVIS capabilities with vehicular antennas remains an area that requires further exploration and optimization.

### 3. Sky Wave Propagation and NVIS

#### 3.1. Sky Wave Propagation

The propagation of sky waves is caused by the internal reflection of electromagnetic waves by the ionosphere. The ionosphere is a region of the Earth's atmosphere, extending from approximately 50 km to 400 km above the surface, where molecules are ionized by solar radiation. This ionization process enables the reflection and refraction of radio waves in the high-frequency (HF) range, typically between 3 and 30 MHz [23, 24].

Figures 1 and 2 illustrated the Sky wave propagation and ionization process in ionosphere. However, Figure 3 illustrates various wave propagation modes, including ground wave, sky wave, and space wave propagation as observed in the Figures 3.

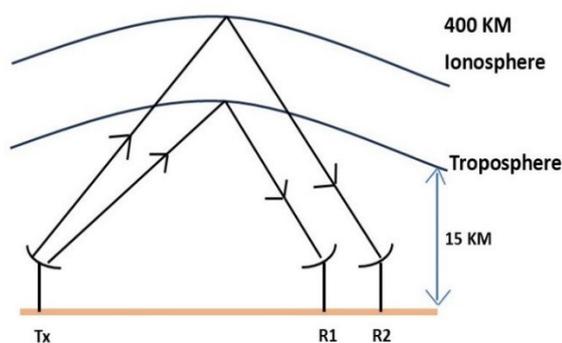


Figure 1 – Sky wave propagation

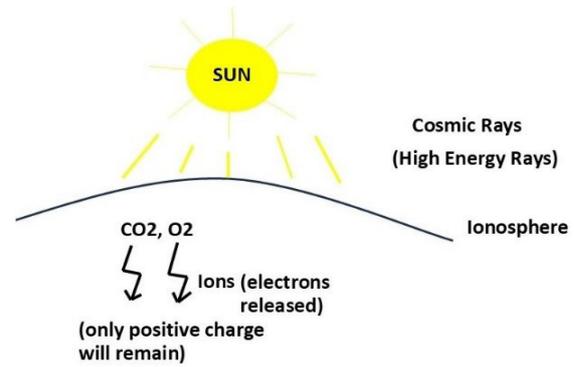


Figure 2 – Ionization process in ionosphere

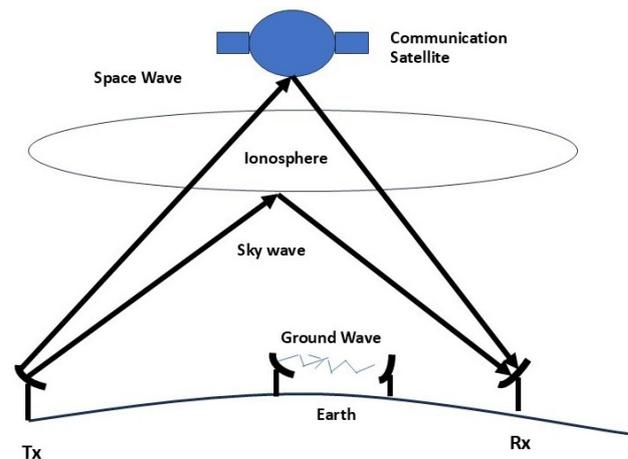


Figure 3 – Ionization process in ionosphere

Figure 4 shows the classification of the Earth's atmosphere into different layers: the troposphere, stratosphere and ionosphere.

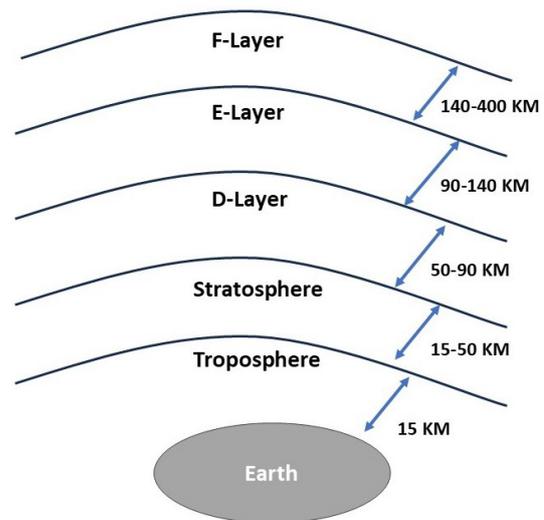


Figure 4 \_ Different layers of atmosphere

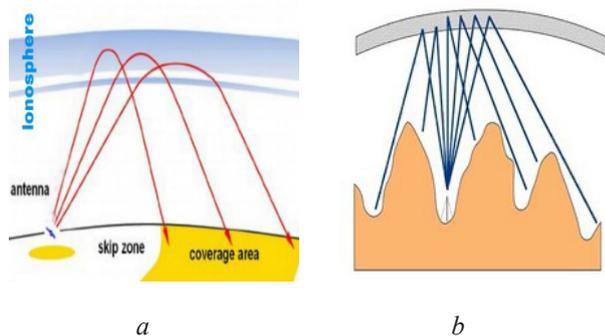
The ionosphere consists of several layers, including the *E* layer, *F* layer, and *D* layer. The *D* layer of the ionosphere absorbs radio signals, helping to determine the minimum frequency that can propagate through the ionosphere. The *F* layer, on the other hand, refracts signals, playing a crucial role in determining the maximum usable frequency [17]. The incident angle of the radio wave also influences how far the signal can travel before being refracted back to Earth.

### Skip zone

One important concept in ionosphere propagation and radio communications is the skip zone. It refers to the region where radio signals cannot be received directly from the transmitter due to the refraction of waves by the ionosphere. Beyond this zone, the refracted signals can be received, enabling long-distance communication [29].

### 3.2. Near vertical incidence skywave

NVIS is a technique used in high-frequency (HF) communication that involves transmitting radio signals at very high radiation angles ( $>75^\circ$ ) using specialized antennas [36, 37]. NVIS takes advantage of the sky wave propagation phenomenon, where radio waves are refracted by the ionosphere and can be received at locations beyond the skip zone [7]. Figure 5 illustrates the difference between a vehicular antenna operating in the HF Band with NVIS and without NVIS.



**Figure 5** – Vehicular antenna in HF range without NVIS (a) and vehicular antenna in HF range with NVIS (b)

NVIS offers several advantages over traditional HF communication techniques:

1. *Extended coverage*: NVIS can provide communication coverage within a radius of several

kilometers, making it suitable for various applications, such as including military operations, disaster relief efforts and military surveillance in remote areas.

2. *Low-power operation*: NVIS antennas can operate at relatively low power levels, making them suitable for portable applications where power consumption is a concern.

3. *Omnidirectional coverage*: NVIS antennas typically provide omnidirectional coverage, ensuring communication in all directions. However, antenna orientation is crucial to achieve the desired radiation pattern.

4. *Reduced multipath fading*: by transmitting signals at high radiation angles, NVIS reduces the effects of multipath fading, which can degrade signal quality in traditional HF communication.

5. *Lower probability of intercept*: due to the low-power operation and vertical radiation pattern, NVIS communication has a lower probability of being intercepted, making it beneficial for secure communications.

6. *Jamming resistance*: NVIS signals are difficult to jam via ground wave propagation, increasing the reliability of communication in contested environments.

### 3.3. Near vertical incidence sky wave deployment

The deployment of communication systems utilizing NVIS technology involves several key steps [27]:

1. *Frequency selection*:

- Choose the appropriate frequency range for NVIS transmission, typically within the HF band of 3–10 MHz, as these frequencies can reflect off the ionosphere at steep angles.

2. *Antenna installation*:

- Install an antenna specifically designed for NVIS communication, capable of transmitting signals at near-vertical angles (close to  $90^\circ$ ).

- Wire antennas, such as dipoles or loops, are commonly used for NVIS deployment.

- Position the NVIS antenna at a reasonable height above the ground, typically between 1 and 10 m (3 and 33 feet). This height ensures that the radio waves return to the Earth's surface at acute angles, enabling effective NVIS communication.

3. *Transceiver setup*:

- Set up the HF transceiver and any other required equipment for NVIS communication.

- Configure the transceiver's power output, modulation parameters, and operating frequency range.

#### 4. Power Requirements:

- NVIS communication requires relatively low power output compared to other communication techniques due to its limited range.

- Typical power requirements range from a few watts to a few hundred watts, depending on the equipment used and the specific application.

NVIS deployment finds applications in various scenarios where reliable short-range communication is required, such as:

- Military operations, especially in areas with challenging terrain or obstructions that limit line-of-sight communication.

- Emergency communication and disaster response efforts, where traditional communication infrastructure may be disrupted or unavailable.

- Remote or rural areas without access to other communication networks.

- Tactical communication in environments where stealth and low probability of intercept are crucial.

By following the proper deployment steps and utilizing the appropriate equipment, NVIS communication can provide a reliable and secure means of communication over short to medium ranges, enabling critical information exchange in challenging environments.

## 4. Challenges and scopes

Designing vehicular antennas for the HF band with NVIS communication presents a range of challenges and opportunities that require careful consideration and innovative solutions. This section highlights the key areas that demand attention and further research.

### 4.1. Material selection

- Selecting the most appropriate material for antenna design is a critical factor that can significantly impact the antenna's performance and efficiency. The choice of material directly influences the conductivity, which in turn affects radiation efficiency and overall antenna performance.

- Copper, aluminum, and graphene are among the potential materials under consideration. While copper (conductivity: 58 MS/m) and aluminum (conductivity: 35 MS/m) are traditional choices, graphene (conductivity: 100 MS/m) has emerged as a promising alternative due to its superior conductivity.

- Graphene's exceptional conductivity makes it a preferred material for potentially enhancing radiation efficiency in vehicular antenna design, as it can improve overall antenna performance.

### 4.2. Antenna design challenges

- Achieving high radiation angles, typically greater than  $75^\circ$ , is crucial for maximizing skip distance coverage in NVIS communication [7]. This angular requirement presents a significant design challenge, as it necessitates careful optimization of the antenna's geometry and positioning.

- Improving key antenna parameters, such as gain, bandwidth, and directivity, is another critical challenge. These parameters are essential for ensuring reliable and efficient communication, especially in military applications where long-range and directional communication is often required [1].

- Incorporating inductors ( $L$ ) and capacitors ( $C$ ) into the antenna design has been proposed as a potential solution to enhance bandwidth and gain, respectively [8]. However, the integration of these components requires careful consideration of their values and placement to avoid compromising other performance metrics.

- Employing multi-arming techniques and offset feeds have been explored as means to increase bandwidth and gain, respectively [2, 19]. However, the effectiveness of these techniques may vary depending on the specific antenna design and operating conditions.

### 4.3. Performance limitations

- Despite ongoing research efforts, existing vehicular antennas in the HF band often suffer from low gain values, typically around  $-20$  dBi, due to poor radiation efficiency [1, 2]. Overcoming this limitation is crucial for achieving reliable and long-range communication.

- Ensuring the proper adjustment of the antenna's radiation angle is vital for reducing the skip zone, a region where signal reception is compromised [7]. Accurate angle adjustment is essential for maximizing the coverage area and enhancing communication reliability.

- Achieving a narrow beam pattern is essential for long-range communication and direction-finding applications. A narrow beam pattern not only improves signal strength and range but also enhances the antenna's directional capabilities, which are critical in military and other specialized applications.

## 4.4. Simulation and modeling

- Accurate simulation and modeling of metallic antennas are crucial for design optimization and performance prediction. Computational techniques and specialized software tools play a vital role in this process, allowing researchers and engineers to evaluate various design configurations and refine antenna parameters before physical prototyping.

- Software tools like 4NEC2, CST, HFSS have been widely used for simulating and analyzing HF band vehicular antennas [30]. These tools enable detailed modeling of antenna structures, accounting for factors such as material properties, geometric configurations, and operating conditions.

- Reliable simulation and modeling techniques are essential for identifying potential issues, optimizing antenna designs, and exploring innovative solutions to address the challenges associated with vehicular antennas in the HF band with NVIS communication [28].

The main challenges in designing vehicular antennas for the HF band with NVIS communication involve achieving high gain values (better than -20 dBi) while maintaining a narrow beam pattern and adequate bandwidth. Additionally, the integration of NVIS capabilities, the selection of appropriate materials, and the accurate modeling and simulation of antenna designs are critical factors that require careful consideration and ongoing research efforts. It is important to note that addressing these challenges not only contributes to the advancement of vehicular antenna technology but also has broader implications for various applications, including military operations, emergency communication, and disaster response efforts. Overcoming these challenges can lead to improved communication reliability, increased range, and enhanced directional capabilities, ultimately enabling more effective and secure information exchange in challenging environments.

## 5. Design and analysis of HF band antenna

### 5.1. Parameters and performance enhancement techniques of vehicular antenna in HF band

Two parameters on which we are working. These are as follows: 1. Gain, and 2. Radiation efficiency.

### 5.1.1. Gain

Gain is classified into two types [6]:

- Directive Gain,

$G_d = \text{Radiation Intensity in particular direction} / \text{average radiated power};$

- Power Gain,

$G_p = \text{Power density radiated in a particular direction by the test antenna} / \text{Power density radiated in that direction by an isotropic antenna.}$

Directive gain and power gain are identical except that power gain takes into account the antenna losses.

So,  $G_p = \eta G_d$  ( $\eta$  lies between 0 and 1).

### 5.1.2. Gain enhancement techniques

a) With offset feed. Due to offset feed, uniform current distribution takes place. So, maximum radiation efficiency is achieved. It can be proved from this formula  $G = \eta D$

With  $\eta$  high, the gain will be high [1].

b) Proper impedance matching also gives better gain due to improvement in  $\eta$  [1].

Example:

$$\Delta f = f_r / Q, \quad (1)$$

$$\Delta f = 600 \text{ KH}; z = 0.600 \text{ MHz}; f_r = 30 \text{ MHz.}$$

$$Q = f_r / \Delta f.$$

Therefore,  $Q = 50$ .

And, if  $\Delta f = 24 \text{ KHz}$ ,  $f_r = 30 \text{ MHz}$ .

Then,  $Q = f_r / \Delta f = 30 \cdot 10^6 / 24 \cdot 10^3 = 1250$ .

It is observed that for the HF band antenna, as the frequency range is between 3 MHz to 30 MHz,  $Q$  changes from 125 to 1250 i. e. 10 times. It is observed that when  $Q$  changes 10 times, gain increases by 10 dB [30].

### 5.1.3. Radiation efficiency

Radiation efficiency is a crucial parameter in antenna design, representing the ratio of the power radiated by the antenna to the total input power. It is a measure of how effectively the antenna converts the input power into radiated electromagnetic waves. For vehicular antennas in the HF band with NVIS communication, optimizing radiation efficiency is essential to ensure reliable and efficient communication.

The theoretical formula for radiation efficiency ( $\eta$ ) is given by:

$$\eta = P_r / P_t; \quad (2)$$
$$\eta = P_r / (P_r + P_l).$$

Therefore,

$$\eta = R_r / (R_r + R_l), \quad (3)$$

Where  $P_r$  is the radiated power;  $P_t$  is the total input power;  $P_l$  represents the power lost due to various factors (e. g., ohmic losses);  $R_r$  is the radiation resistance;  $R_l$  is the ohmic resistance.

#### 5.1.4. Efficiency enhancement techniques

##### 1. Optimizing radiation and loss resistance

The radiation efficiency can be expressed as:

$$\eta = 100 / (1 + R_{loss} / R_{rad}). \quad (4)$$

For high radiation efficiency ( $\eta$ ), the ratio of the loss resistance ( $R_{loss}$ ) to the radiation resistance ( $R_{rad}$ ) should be minimized. This can be achieved by reducing the loss resistance and increasing the radiation resistance. Example: for a two-wire dipole antenna in free space, the radiation resistance ( $R_{rad}$ ) is proportional to the square of the length of the antenna. By increasing the length of the dipole, the radiation resistance increases, leading to an enhancement in radiation efficiency.

##### 2. Optimizing inductance and capacitance values

The bandwidth efficiency ( $\eta_B$ ) is given by:

$$\eta_B = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (5)$$

where,  $L$  and  $C$  are the inductance and capacitance values, respectively. To achieve high radiation efficiency, the values of  $L$  and  $C$  should be kept low, resulting in a high-quality factor ( $Q$ ). This technique is particularly relevant for electrically small antennas commonly used in vehicular applications.

##### 3. Antenna orientation and frequency dependence

The radiation efficiency can be influenced by the orientation of the antenna and the operating frequency. Experimental studies have shown that for vertical orientation, the radiation efficiency can be enhanced by 10 % to 23 % in the frequency range of 2 MHz to 8 MHz, compared to horizontal orientation, where the efficiency is limited to approximately 2 %.

By employing these techniques and optimizing the antenna design parameters, it is possible to improve the radiation efficiency of vehicular antennas for HF band operation with NVIS communication,

enabling more efficient and reliable communication [25, 26].

#### 5.1.5. Directivity

Directivity is a fundamental parameter in antenna theory, representing the ratio of the maximum radiation intensity to the average radiation intensity [25]. It is mathematically expressed as:

$$D = (\text{Maximum radiation intensity}) / (\text{Average radiation intensity}).$$

The range of directivity is given by  $1 \leq D < \infty$ , where  $D = 1$  corresponds to an isotropic radiator, which has an omnidirectional radiation pattern with equal radiation intensity in all directions.

As the value of  $D$  increases, the radiation pattern becomes more directional, with the maximum radiation intensity concentrated in a specific direction.

The directivity of an antenna is closely related to its effective aperture ( $A_e$ ), which is a measure of the antenna's ability to capture or radiate electromagnetic energy. The relationship between directivity and effective aperture is given by:

$$D = (4\pi A_e) / \lambda^2.$$

1. As the effective aperture increases, the directivity also increases, resulting in a more directional radiation pattern. The effective aperture depends on various factors, including the antenna's geometry, size, and the voltage induced across the antenna terminals. The induced voltage is proportional to the incident electric field and the length of the antenna.

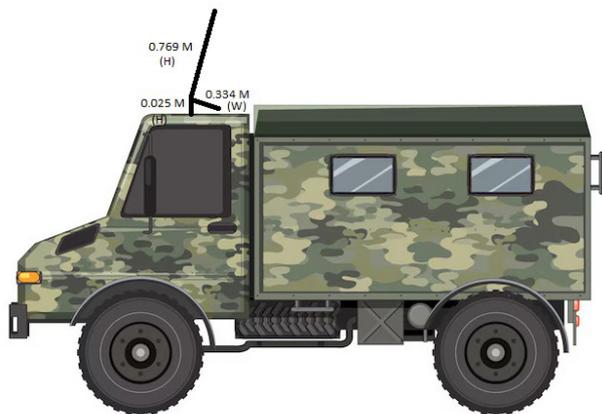
For example, a half-wave dipole antenna exhibits a figure-eight radiation pattern, with maximum radiation intensity perpendicular to the antenna's axis [30]. In contrast, a monopole antenna, which is essentially a half-wave dipole with a ground plane, exhibits a unidirectional radiation pattern, with maximum radiation intensity in one direction.

2. As radius of conductor is increasing, Bandwidth became narrow. So, chances are to get unidirectional pattern with antenna with large radius [6].

#### 5.2. Design of HF band vehicular antenna

By carefully designing the antenna's geometry and optimizing the effective aperture, it is possible to achieve the desired directivity and radiation pattern for specific applications, such as vehicular antennas

in the HF band with NVIS communication. Here, the design of the inverted L antenna is shown below [2]:  
If,  $f = 30 \text{ MHz}$ ,  $\lambda = c/f = (3 \cdot 10^8)/(30 \cdot 10^6) = 10 \text{ m}$ .



**Figure 6** – Design of inverted L HF band antenna with NVIS (scale: 1 m = 1 cm)

Where ‘m’ stands for meters, ‘L’ stands for Length, ‘W’ stands for Width, ‘Height’ stands for Height of Antenna.

NEC2, CST, HFSS etc are several simulation software available on which proposed antenna can be designed. Table 2 below shows comparison of Simulation Tools.

Table 2

### Comparison of simulation tools

Simulation tool	Method based on	Observation
NEC2	MOM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computational time is less;</li> <li>• It is a free software;</li> <li>• 3D figures are not possible as such</li> </ul>
HFSS	FEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computational time is more;</li> <li>• 3D figures of all fields, pattern is possible;</li> <li>• Values of parameters are close to practical values</li> </ul>
CST	FIT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computational time is more;</li> <li>• 3D figures of all fields, pattern is possible</li> </ul>

Among these, HFSS is preferred. HFSS uses adaptive meshing, the Finite Element Method (FEM), and stunning graphics to provide unmatched performance and understanding for all of your 3D

EM challenges. S-Parameters, Resonant Frequency, and Fields are among the parameters that may be calculated using HFSS.

### Conclusion

This paper addresses the design challenges and limitations of vehicular antennas operating in the high-frequency (HF) band with Near Vertical Incidence Skywave (NVIS) communication for military applications. The primary objectives are to enhance critical performance parameters such as gain, radiation efficiency, and bandwidth, and achieve unidirectionality while integrating NVIS capabilities.

The proposed solutions include the incorporation of inductors, capacitors, and multiarming techniques to optimize antenna parameters. Material selection, such as the use of graphene with high conductivity, is also explored. Proper adjustment of the radiation angle and effective aperture optimization are emphasized to reduce the skip zone and achieve the desired directivity.

By implementing these design strategies, the research aims to develop a low-profile, efficient HF band vehicular antenna with improved gain (better than -20 dBi), radiation efficiency, and bandwidth, while enabling secure and reliable data and voice transmission through NVIS communication. The integration of NVIS capabilities further extends coverage in nearby regions, addressing the skip zone limitation. The proposed solutions address the existing limitations in vehicular antenna design for military applications, enabling secure and efficient communication in challenging environments. The research contributions pave the way for further advancements in antenna technology and have potential implications beyond military applications, benefiting various fields requiring reliable and secure communication systems.

### References

1. Maxim Ignatenko, Saurabh A. Sanghai, Gregor Lasser, Bradley Allen, Richard smith, Milica Notaros and Dejan S Filipovic. Wide-Band High-Frequency Antenna for Military Vehicles. IEEE Antenna & Propagation Magazine – 2016.
2. Saurabh A. Sanghai, Maxim Ignatenko and Dejan S Filipovic. Low – Profile two arm inverted – L antenna for Vehicular HF Communications. IEEE Transactions on Antenna and Propagation. 2017;65(11).

3. James Baker, Hyoung-Sun Youn, Nuri Celik and Magdy F Iskander. Low Profile Multi-frequency HF Antenna Design for Coastal Radar Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2010;(9).
4. Maxim Ignatenko, Dejan D Filipovic. On the Design of Vehicular Electrically Small Antennas for NVIS Communications. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*. 2016;64(6).
5. “Directional Array for Near Vertical Incidence Skywave (NVIS)” Antenna Designer’s Notebook. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2014;56(2).
6. “Antenna and Wave Propagation”, by A.K Gautam, Katson Books 2012W.
7. Ben A Witvliet, Erik van Maanen, George J Petersen, Albert J Westenberg, Mark J Bentum, Cornelis H Slump and Roel Schiphorst. Near Vertical Incidence Skywave Propagation: Elevation Angles and Optimum Antenna Height for Horizontal Dipole Antennas. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*. 2015.
8. Jungsuek Oh, Jihun Choi, Fikadu T Dagefu and Kamal Sarabandi. Extremely Small Two-Element Monopole Antenna for HF Band Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013;61(6).
9. Ben Witvliet and Mark J Bentum. Near Vertical Incidence Skywave (NVIS) Antenna and Propagation Research in The Netherlands. Conference Paper November 2014.
10. Griffiths, D., & Baker, A.R. (1990). A low profile loop antenna for communications using NVIS.
11. Ignatenko M. [et al.]. Wide-Band High-Frequency Antennas for Military Vehicles: Design and testing low-profile half-loop, inverted-L, and umbrella NVIS antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2016;58(6):64-74. **DOI:** 10.1109/MAP.2016.2609806
12. Richie JE, Joda T. HF antennas for NVIS applications mounted to helicopters with tandem main rotor blades. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2003;45(2):444-448.
13. Collins BS, Phillips B. (1988). A wideband transportable antenna for NVIS links.
14. Ignatenko M, Filipović .S. Application of characteristic mode analysis to HF low profile vehicular antennas. 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). 2014:850-851 p.
15. Katal N. (1990). A generic set of HF antennas for use with spherical model expansions. *Theory of Computing Systems ∨ Mathematical Systems Theory*, 2.
16. Austin BA, Liu WC. An optimized vehicular loop antenna for NVIS applications. 2000 Eighth International Conference on HF Radio Systems and Techniques, Guildford, UK. 2000:43-47 p. **DOI:** 10.1049/cp:20000146
17. Jungsuek Oh, Jihun Choi, Fikadu T Dagefu and Kamal Sarabandi. Extremely Small Two-Element Monopole Antenna for HF Band Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013;61(6).
18. Murray KP, Austin BA. Novel antenna configurations for vehicle-borne NVIS applications. 1995 Ninth International Conference on Antennas and Propagation, ICAP '95 (Conf. Publ. No. 407), Eindhoven, Netherlands. 1995;(1):415-418. **DOI:** 10.1049/cp:19950340
19. Porte J. [et al.]. Education and e-health for developing countries using NVIS communications. 2018 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), Malambe, Sri Lanka. 2018;1-5 p. **DOI:** 10.1109/R10-HTC.2018.8629842
20. Walden MC. The extraordinary wave mode: Neglected in current practical literature for HF NVIS communications. The Institution of Engineering and Technology 11<sup>th</sup> International Conference on Ionospheric radio Systems and Techniques (IRST 2009), Edinburgh. 2009;1-5 p. **DOI:** 10.1049/cp.2009.0028
21. Alex Bouvy, Nader Behdad. A Heuristic Study of the Bandwidth Potential of Electrically- small, Platform-Based Antennas at the HF Band. *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*. 2020;69(2).
22. Marcus C. Walden. Comparison of Propagation predictions and measurements for midlatitude HF near vertical incidence skywave links at 5 MHz. *Radio Science*. 2012;(47):RSOL09.
23. Mishra V, Basu A. Short dipole antenna array for on-ship NVIS application. 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Phuket, Thailand. 2017;1-2 p. **DOI:** 10.1109/ISANP.2017.8228957
24. Hoult NS, Whiffen JR, Tooby MH, Arthur PC. 16 kbps modems for the HF NVIS channel. 2000 Eighth International Conference on HF Radio Systems and Techniques, Guildford, UK. 2000;317-321 p. **DOI:** 10.1049/cp:20000195
25. Prasad KD, Prasad Manish. *Antenna and Wave Propagation*. Satya Prakashan New Delhi.
26. “Antenna and Wave Propagation”, G.S.N Raju, Pearson Publication, 2008.
27. Thomas O Jones III. Directional Array for Near Vertical- Incidence Skywave (NVIS). *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2014.
28. Erik Maanen [et al.]. Measuring the isolation of the circularly Polarized Characteristic Waves in NVIS Propagation. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*. 2015.
29. Mattioni L, Marrocco G. Design of a Broadband HF Antenna for Multimode Naval Communications – Part II: Extension to VHF/UHF Ranges. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2007;(9).
30. Ruben FM. Delgado Castillo, Ruy Ma, Nader Behdad. Platform-Based, Electrically – small HF Antenna with switchable Directional Radiation Patterns.

IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021;69(8).

31. John D Kraus, Ronald J Marhefka, Ahmad S Khan. Antenna and Wave Propagation. McGraw Hill Publication Third Edition, 2007.

32. Mizuji EG, Abbasi Arand B, Abdolali A. A New Method for Improving the Performance of Antennas Mounted on a Vehicle in the HF Band. 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – fall (PIERS – Fall), Xiamen, China. 2019;2379-2384 p.

**DOI:** 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021864

33. Petrus J. Coetzee, Warren P. du Plessis. Performance Limiters of Near-Vertical-Incidence Skywave Propagation. IEEE Antennas & Propagation Magazine. 2020.

34. Witvliet BA, Alsina-Pagès RM. Radio communication via Near Vertical Incidence Skywave propagation: an overview. Telecomm Syst. 2017;(66):295-309.

**DOI:** 10.1007/s11235-017-0287-2

35. Saurabh Shanghai, Maxim Ignatenko, Dejan S Filipovic. Two Arm Offset Fed Inverted – L Antenna for Vehicular HF Communication. IEEE conference – 2015.

36. Saakian A. CEM optimization of the HF antennas installations onboard the aircraft. Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, IL, USA. 2012;1-2 p.

**DOI:** 10.1109/APS.2012.6348979

37. Richie JE, Joda T. HF antennas for NVIS applications mounted to helicopters with tandem main rotor blades. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2003;45(2):444-448.

**DOI:** 10.1109/TEM.2003.811317

38. Hagn GH, JE. van der Laan. Measured relative responses toward the zenith of short-whip antennas on vehicles at high frequency. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1970;19(3):230-236.

**DOI:** 10.1109/T-VT.1970.23459

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-174-185

# Измерительный преобразователь напряжения произвольной формы для широкополосного вольтметра переменного тока

О.В. Дворников<sup>1</sup>, В.Н. Бахур<sup>1</sup>, А.Г. Бахир<sup>1</sup>, В.М. Лозовский<sup>1</sup>, В.А. Чеховский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Минский научно-исследовательский приборостроительный институт,  
ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Беларусь

<sup>2</sup>Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,  
ул. Бобруйская, 11, г. Минск 220006, Беларусь

Поступила 17.04.2024

Принята к печати 05.07.2024

Измерение напряжения переменного тока является одним из наиболее распространённых видов измерений в различных областях науки и техники. Для оценки уровня напряжения переменного тока применяются вольтметры переменного тока, которые позволяют регистрировать амплитудные, средние и/или среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения. Среди этих средств измерений особо значимы вольтметры СКЗ напряжения, т. к. СКЗ – фундаментальная физическая характеристика электрического сигнала, являющаяся истинной мерой мощности. Широкое распространение сигналов несинусоидальной формы обуславливает необходимость создания вольтметров для прямого измерения СКЗ, основным узлом которых является измерительный преобразователь переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения (ПСКЗ). Анализ существующих технических решений показывает, что для высокоточного измерения СКЗ напряжения произвольной формы со спектром в полосе частот от 20 Гц до 20–50 МГц целесообразно применение ПСКЗ с термоэлектрическим преобразователем (ТЭП). Такой ПСКЗ должен содержать дифференциальный полупроводниковый ТЭП и входной широкополосный усилитель напряжения с малой нелинейностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Целью работы являлась разработка измерительного ПСКЗ напряжения произвольной формы, при которой особое внимание уделено модернизации ТЭП и уменьшению погрешности ПСКЗ за счёт коррекции АЧХ входного усилителя и введения автоматической калибровки выходного напряжения. В статье описаны особенности полупроводниковых кристаллов и конструктивного исполнения ТЭП в виде микросхемы и микросборки, результаты измерений параметров ПСКЗ и элементов ТЭП. Отмечено существенное влияние АЧХ входного усилителя и напряжения смещения нуля транзисторов ТЭП на погрешность ПСКЗ. Модернизация входного усилителя и введение автоматической калибровки выходного напряжения обеспечили погрешность преобразования синусоидального сигнала менее 1 % в диапазоне от 20 Гц до 50 МГц.

**Ключевые слова:** термоэлектрический преобразователь, преобразователь переменного напряжения в постоянное, измерение среднеквадратического значения, измерение переменного напряжения

**Адрес для переписки:**

Дворников О.В.  
Минский научно-исследовательский приборостроительный институт,  
ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Беларусь  
e-mail: oleg\_dvornikov@tut.by

**Address for correspondence:**

Dvornikov O.V.  
Minsk Research Instrument-Making Institute  
Ya. Kolas str., 73, Minsk 220113, Belarus  
e-mail: oleg\_dvornikov@tut.by

**Для цитирования:**

О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский.  
Измерительный преобразователь напряжения произвольной формы для широкополосного вольтметра переменного тока.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 174–185.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-174-185

**For citation:**

Dvornikov OV, Bakhur UN, Bakhir AG, Lazouski UM, Tchekhovski VA.  
Arbitrary Waveform Voltage Measuring Converter for Wideband AC Voltmeter.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):174–185. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-174-185

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-174-185

# Arbitrary Waveform Voltage Measuring Converter for Wideband AC Voltmeter

O.V. Dvornikov<sup>1</sup>, U.N. Bakhur<sup>1</sup>, A.G. Bakhir<sup>1</sup>, U.M. Lazouski<sup>1</sup>, V.A. Tchekhovski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Minsk Research Instrument-Making Institute  
Ya. Kolas str., 73, Minsk 220113, Belarus

<sup>2</sup>Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University  
Bobruiskaya str., 11, Minsk 220006, Belarus

Received 17.04.2024

Accepted for publication 05.07.2024

## Abstract

Alternating current (AC) voltage measurement is one of the most common types of measurements in various fields of science and technology. To evaluate the AC voltage level, special voltmeters are used which allow recording of amplitude, average and/or root mean square (RMS) voltage values. Among these measuring instruments, voltmeters of mean square voltage are especially significant because RMS is a fundamental physical characteristic of an electrical signal and is a true measure of power. The wide distribution of non-sinusoidal signals necessitates the creation of voltmeters for direct measurement of RMS. The main component of such voltmeter is an AC voltage to direct current (DC) voltage measuring converter based on the root-mean-square value level (AC RMS-DC converter). An analysis of existing technical solutions shows that it is advisable to use a thermoelectric converter (TEC) for high-precision measurement of RMS voltage of an arbitrary shape with a spectrum in the frequency band from 20 Hz to 20–50 MHz. Such a AC RMS-DC converter must contain a differential semiconductor TEC and an input broadband voltage amplifier with low nonlinearity of the frequency response. The aim of the paper was to develop a measuring AC RMS-DC converter of arbitrary shape voltage in which special attention is paid to modernization of the TEC and reduction of the AC RMS-DC converter error using corection of the frequency response of the input amplifier and introduction automatic calibration of the output voltage. Features of semiconductor chips and design of TEC in the form of a microcircuit or microassembly, results of converter's and TEC elements' parameters measurements are presented. A significant influence of the frequency response of the input amplifier and the offset voltage of the TEC transistors on the AC RMS-DC converter error was noted. Modernization of the input amplifier and introduction of automatic calibration of the output voltage ensured an error in a sinusoidal signal converting of less than 1 % in the range from 20 Hz to 50 MHz.

**Keywords:** thermoelectrical converter, RMS-DC converter, RMS measurement, AC voltage measurement

---

### Адрес для переписки:

Дворников О.В.  
Минский научно-исследовательский приборостроительный институт,  
ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Беларусь  
e-mail: oleg\_dvornikov@tut.by

### Address for correspondence:

Dvornikov O.V.  
Minsk Research Instrument-Making Institute  
Ya. Kolas str., 73, Minsk 220113, Belarus  
e-mail: oleg\_dvornikov@tut.by

---

### Для цитирования:

О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский.  
Измерительный преобразователь напряжения произвольной формы для широкополосного вольтметра переменного тока.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 174–185.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-174-185

### For citation:

Dvornikov OV, Bakhur UN, Bakhir AG, Lazouski UM, Tchekhovski VA.  
Arbitrary Waveform Voltage Measuring Converter for Wideband AC Voltmeter.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):174–185. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-174-185

## Введение

В различной радиоэлектронной аппаратуре, технических средствах связи, устройствах обработки информации, системах автоматики и управления широко используются сигналы произвольной формы в виде переменных токов  $i(t)$  и напряжений  $v(t)$ . Эти электрические сигналы могут быть сигналами постоянного тока, синусоидальными, переменными с постоянной составляющей, случайными, шумовыми или какой-то последовательностью импульсов, поэтому фундаментальной физической характеристикой, описывающей их, является среднеквадратическое значение напряжения  $V_{RMS}$  и дополнительный параметр в виде коэффициента амплитуды (*peak factor, crest factor*)  $k_P$  [1]:

$$V_{RMS} = \left( \frac{1}{t_{J+1} - t_J} \int_{t_J}^{t_{J+1}} v^2(t) dt \right)^{0.5}; \quad (1)$$

$$k_P = \frac{V_P}{V_{RMS}}; \quad (2)$$

$$V_P = \max_{t \in (t_J, t_{J+1})} |v(t)|; \quad (3)$$

$$t_J = t_0 + jT_P, t_{J+1} = t_0 + (j+1)T_P, \quad (4)$$

где  $t_{j+1} - t_j$  – заданный интервал времени, причём для периодических сигналов  $t_0$  – некоторый фиксированный момент времени;  $T_P$  – период,  $j = 0, 1, 2, \dots$

Для синусоидального сигнала  $k_P = \sqrt{2}$ . для «белого» шума коэффициент амплитуды не менее 3, для периодических  $\delta$ -образных (коротких) импульсов может превышать 9 [1, 2].

Потребность в высокоточной регистрации СКЗ напряжения привела к разработке ряда вольтметров переменного тока ВЗ-71, ВЗ-71/1, ВКЗ-78А, ВЗ-83, ВЗ-83/1, ВЗ-100/1, ВЗ-102, серийно выпускаемых предприятиями Российской Федерации. Изучение описаний типа средств измерений указанных приборов позволило установить следующее.

Вольтметры ВЗ-71, ВЗ-71/1 предназначены для измерений СКЗ сигналов переменного тока произвольной формы до частоты 10 МГц прямым методом измерений с нормированием погрешности, а в диапазоне частот синусоидального напряжения от 100 кГц до 1 ГГц – с помощью пробника по компенсационной схеме. Прямое

измерение СКЗ напряжения заключается в возведении мгновенного значения входного напряжения в квадрат, усреднении с помощью фильтра нижних частот, преобразовании с помощью аналого-цифрового преобразователя в цифровую форму и извлечении квадратного корня из суммы квадратов в цифровом виде в соответствии с выражением (1). При этом погрешность вольтметра определяется, в основном, квадратором, построенным на базе микросхемы широкополосного аналогового перемножителя [3] и составляет около 2,5 % на частоте 1 МГц. Погрешность измерения СКЗ синусоидального сигнала с помощью пробников – около 25 % на частоте 1 ГГц.

Вольтметры ВЗ-83, ВЗ-83/1 предназначены для измерений СКЗ синусоидального напряжения в диапазоне частот от 1 кГц до 5 МГц с максимальной погрешностью 3 % и в диапазоне от 1 МГц до 1,0 ГГц с максимальной погрешностью 10 %.

Милливольтметры высокочастотные ВЗ-102 предназначены для измерений СКЗ синусоидального напряжения в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц с максимальной погрешностью 0,7 % и в диапазоне от 30 МГц до 1,5 ГГц с максимальной погрешностью 30 %.

Наилучшим, с нашей точки зрения, сочетанием параметров характеризуется прибор ВКЗ-78А, который обеспечивает погрешность измерений СКЗ напряжения переменного тока около 1 % в диапазоне частот от 10 Гц до 1 МГц и высокочастотного напряжения синусоидальной формы с максимальной погрешностью около 16 % в диапазоне частот от 10 МГц до 2,0 ГГц.

Заметим, что только приборы ВЗ-71 и ВКЗ-78А позволяют регистрировать напряжение переменного тока произвольной формы с погрешностью менее 3 % в диапазоне частот до 1 МГц.

Измерение СКЗ напряжения синусоидального сигнала обычно предполагает преобразование измеряемого сигнала в напряжение постоянного тока, выполняемое пиковым детектором, и сравнение его с выходным напряжением постоянного тока идентичного по параметрам пикового детектора, соединённого с выходом встроенного в вольтметр управляемого источника синусоидального сигнала. Действие цепи отрицательной обратной связи внутри прибора обеспечивает приблизительное равенство выходных напряжений постоянного тока

пиковых детекторов, при этом по уровню выходного напряжения встроенного источника синусоидального сигнала можно определить СКЗ напряжения измеряемого сигнала.

Такой метод регистрации СКЗ обеспечивает высокую точность в широкой полосе частот только в том случае, когда форма входного сигнала вольтметра идентична форме встроенного источника синусоидального сигнала. В противном случае, например, для измеряемых коммутируемых синусоидальных сигналов, сигналов, формируемых тиристорами, синусоидальных сигналов с большим количеством гармоник, специальных видов сигналов, применяемых при передаче данных, возникает дополнительная погрешность, определяемая отношением коэффициента амплитуды измеряемого сигнала к синусоидальному, т. е.  $k_p = \sqrt{2}$ .

Обычно, для измерения СКЗ напряжения сигналов произвольной формы применяют различные типы серийно выпускаемых ПСКЗ:

– ПСКЗ с экспоненциально-логарифмическим преобразованием, которые характеризуются высокой точностью преобразования в диапазоне частот до 200 кГц и  $k_p < 5$  [4];

– ПСКЗ на умножителях напряжения сохраняют работоспособность в полосе частот до 3 ГГц, однако не допускают наличия постоянной и низкочастотной составляющих в спектре сигнала и их погрешность довольно велика [3];

– малую погрешность преобразования в широкой полосе частот обеспечивают ПСКЗ с ТЭП [5–10].

В последнее время основные усилия при разработке микросхем ПСКЗ направлены на совершенствование схемотехнического синтеза на субмикронных КМОП-транзисторах [11, 12]. Эти изделия предназначены для встраивания в сложно-функциональные аналого-цифровые устройства и поэтому исследования сосредоточены на проблемах уменьшения тока потребления и занимаемой ПСКЗ площади полупроводникового кристалла. Хотя по указанным направлениям получены положительные результаты, анализ более, чем 10 современных КМОП ПСКЗ, показал, что достигнутая погрешность преобразования низкочастотного (от 1 до 10 кГц) синусоидального сигнала более  $\pm 2\%$ , а погрешность преобразования сигналов произвольной формы вообще не нормируется.

Резюмируя вышеизложенное, можно утверждать, что:

а) целесообразна разработка измерительного ПСКЗ с ТЭП для высокоточного измерения напряжения произвольной формы со спектром в полосе частот от 20 Гц до 20–50 МГц;

б) ПСКЗ должен содержать дифференциальный полупроводниковый ТЭП и входной широкополосный усилитель напряжения с малой нелинейностью АЧХ;

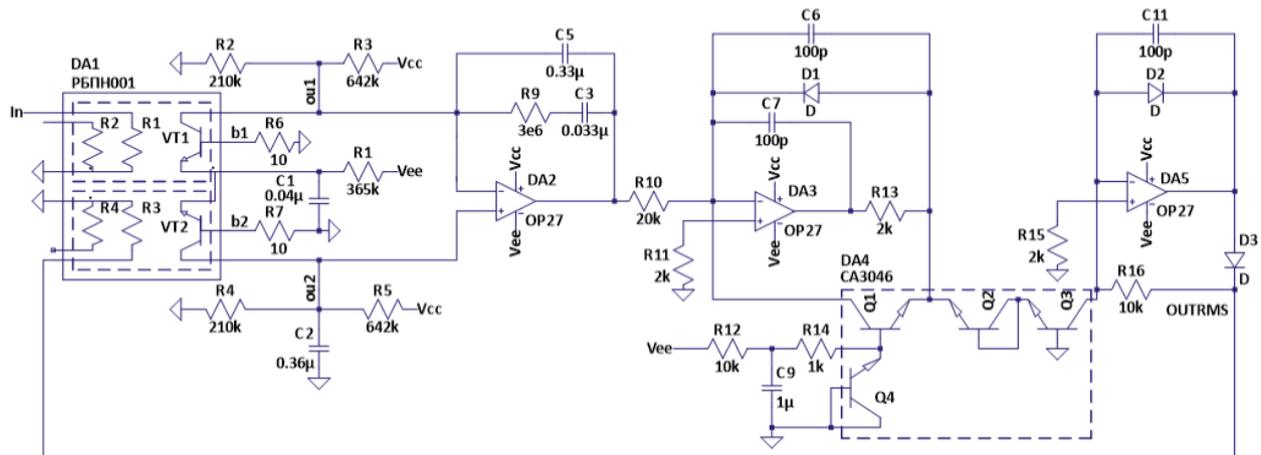
в) дифференциальный полупроводниковый ТЭП следует реализовать в виде двух термоизолированных резисторно-транзисторных термоэлектрических блоков (ТЭБ) с хорошей идентичностью электрических и тепловых характеристик и высоким коэффициентом термоэлектрического преобразования входной мощности в выходное напряжение  $K_{PV}$ ;

г) дифференциальная конструкция ТЭП позволит уменьшить влияние на погрешность преобразования ПСКЗ нелинейной зависимости выходного напряжения ТЭБ от входной мощности. Полупроводниковая реализация уменьшит стоимость ТЭП и обеспечит идентичность параметров интегральных элементов. Применение в качестве нагревательного элемента интегрального резистора и в качестве датчика температуры, расположенного рядом с ним *n-p-n*-транзистора, увеличит  $K_{PV}$ . Соединение *n-p-n*-транзисторов двух ТЭБ по схеме дифференциального усилителя (ДУ) также увеличивает  $K_{PV}$ . Идентичные параметры элементов двух ТЭБ обеспечат малое напряжение смещения нуля, указанного ДУ.

Целью работы являлась разработка измерительного ПСКЗ напряжения произвольной формы, при которой особое внимание уделено модернизации ТЭП и уменьшению погрешности ПСКЗ за счёт коррекции АЧХ входного усилителя и введения автоматической калибровки выходного напряжения.

### Термоэлектрический преобразователь

За основу при создании измерительного ПСКЗ был взят преобразователь с микросхемой РБПН001 резисторно-транзисторного ТЭП [13], в которой каждый ТЭБ имеет два нагревательных резистора с сопротивлением около 400 Ом (рисунк 1).



**Рисунок 1** – Упрощенная электрическая схема измерительного преобразователя переменного напряжения

**Figure 1** – Simplified electrical circuit of the measuring alternating current voltage converter

Для установления направлений модернизации измерительного ПСКЗ, показанного на рисунке 1, была создана модель ТЭП в виде эквивалентной электрической схемы, идентифицированы параметры модели на основе измерений статических и динамических характеристик микросхемы РБПН001 и проведено схемотехническое моделирование, которое показало, что [13]:

- наиболее значительно влияет на работоспособность и погрешность ПСКЗ при малых входных сигналах напряжение смещения нуля ДУ на транзисторах VT1, VT2;

- параллельное включение двух резисторов (R1 и R2, R3 и R4), т. е. уменьшение суммарного сопротивления нагревательного резистора  $R_H$ , уменьшает погрешность ПСКЗ;

- влияние на погрешность ПСКЗ напряжения смещения нуля ДУ на транзисторах VT1, VT2 существенно больше, чем напряжения смещения нуля операционного усилителя интегратора DA2, что обусловлено наличием усиления ДУ на VT1, VT2 приблизительно равно 30.

Следует заметить, что с источником входного сигнала (узел In на рисунке 1) соединён только один элемент ПСКЗ – нагревательный резистор  $R_H$ , все остальные элементы схемы работают с напряжением постоянного тока, поэтому высокочастотный предел ПСКЗ будет определять паразитная ёмкость резистора  $R_H$  и проходная ёмкость между резистором  $R_H$  и коллектором  $n-p-n$ -транзистора ТЭБ.

Таким образом, для уменьшения погрешности измерительного ПСКЗ на рисунке 1 следует:

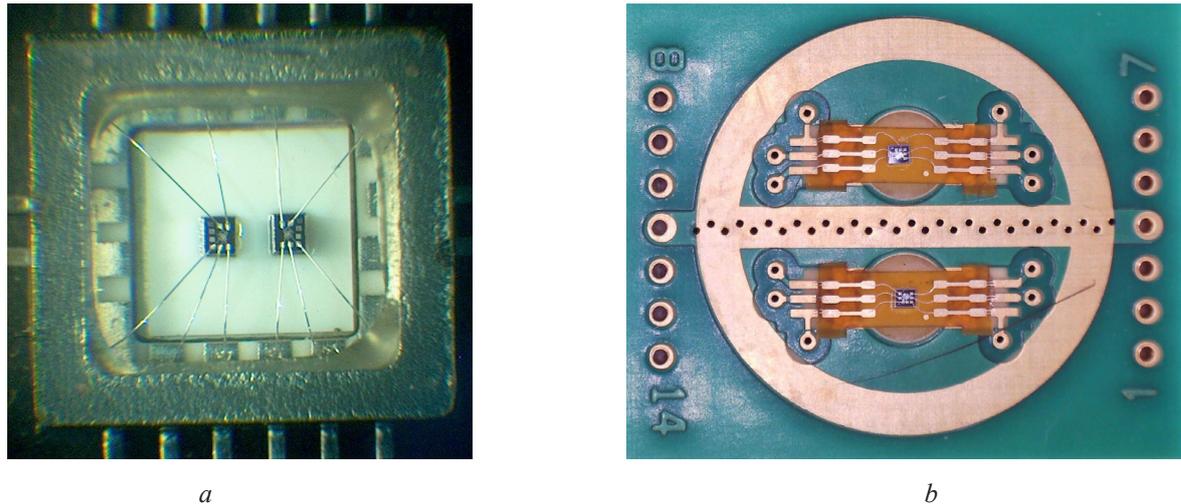
- увеличить идентичность параметров элементов ТЭБ и/или разработать методики компенсации напряжения смещения нуля ДУ на транзисторах VT1, VT2;

- увеличить  $K_{PV}$  за счёт уменьшения теплоотвода от кристаллов ТЭБ и/или уменьшения сопротивления нагревательного резистора;

- уменьшить паразитные ёмкости нагревательного резистора.

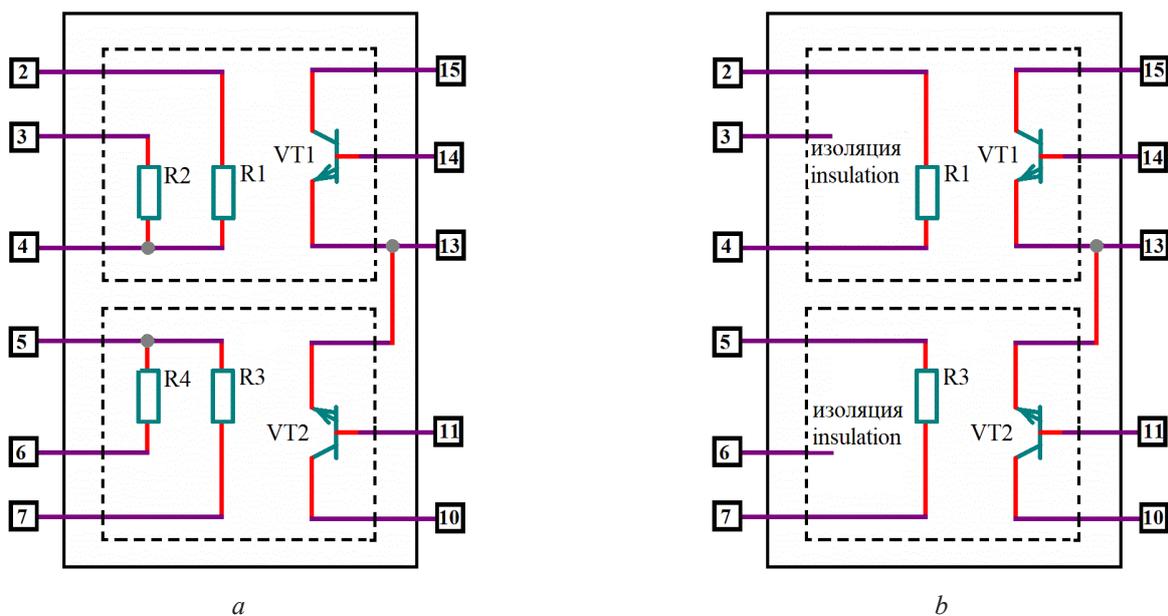
Доработка ТЭП заключалась в создании и изучении характеристик трёх вариантов нагревательных резисторов и двух конструктивных исполнений, увеличивающих  $K_{PV}$ : применении теплоизолирующей эбонитовой подложки толщиной 400 мкм для размещения двух кристаллов ТЭБ в 16-ти выводном корпусе (рисунок 2a) и расположении двух кристаллов ТЭБ на полиимидной пленке толщиной 50 мкм (рисунок 2b). Так как теплопроводность полиимидной плёнки сравнима с теплопроводностью эбонита, но толщина почти в 8 раз меньше, то рассеиваемая нагревательным резистором мощность должна в большей степени нагревать термочувствительный транзистор из-за уменьшения теплоотвода в окружающую среду.

Модернизированные микросхемы термоэлектрического преобразователя ПН002-01, ПН002-02, ПН002-03 содержат два одинаковых  $n-p-n$ -транзистора и нагревательные резисторы. В каждой из микросхем ПН002-01, ПН002-02 имеется два поликремниевых резистора с сопротивлением  $350 \pm 70$  Ом и  $250 \pm 50$  Ом соответственно, а в ПН002-03 – один полупроводниковый резистор с сопротивлением  $300 \pm 60$  Ом (рисунок 3).



**Рисунок 2** – Фотографии различных конструктивных исполнений термоэлектрического преобразователя: *a* – в корпусе H04.16-1; *b* – на полиимидной плёнке

**Figure 2** – Photos of various designs of thermoelectric converter: *a* – in package H04.16-1; *b* – on polyimide film



**Рисунок 3** – Электрическая схема термоэлектрического преобразователя с нумерацией выводов для корпуса H16.48-1: *a* – ПН002-01 и ПН002-02; *b* – ПН002-03

**Figure 3** – Electrical circuit of the thermoelectric converter with pin numbering for package H16.48-1: *a* – ПН002-01 and ПН002-02; *b* – ПН002-03

Формирование нагревательных резисторов двух видов, т.е. на полупроводниковой и поликремниевой области, обусловлено неоднозначным влиянием параметров указанных областей на характеристики ТЭБ, которое может быть изучено экспериментально. Так, поликремниевый резистор *R1* расположен

на расстоянии 5 мкм от эмиттерной области *n-p-n*-транзистора и, следовательно, должен эффективно нагревать эмиттерный переход, *R2* – на расстоянии 27 мкм, а полупроводниковый резистор – на расстоянии 48,5 мкм. Однако поликремниевые резисторы расположены на окисле кремния, теплопроводность которого

почти в 21 раз хуже теплопроводности кремния, и поэтому неочевидно какой резистор (полупроводниковый или поликремниевый) обеспечит больший  $K_{PV}$ . Для типовых технологических маршрутов изготовления биполярных микросхем поликремниевые резисторы со структурой поликремний-окисел-полупроводник обычно обладают меньшей удельной ёмкостью, чем низкоомные полупроводниковые резисторы, сформированные на эмиттерной области  $n-p-n$ -транзистора. В то же время нагревательный резистор микросхемы ПН002-03 выполнен из двух параллельно соединённых областей  $n+$ -эмиттера и  $p$ -базы, что должно обеспечить уменьшение удельной паразитной ёмкости конструктивно, а также путём увеличения обратного напряжения на выводе «изоляция».

Для изучения электропараметров без влияния корпуса и/или соединительных проводников, измерения элементов ТЭБ выполнялись на полупроводниковых пластинах с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A, зондовой станции CascadeSummit 11000B-AP и прецизионного измерителя LCR E4980A.

Изучались пробивные напряжения всех обратно смещённых  $p-n$ -переходов, зависимости тока через резистор от напряжения на нём, коллекторного тока от напряжения коллектор-эмиттер при фиксированном токе базы, ёмкости переходов эмиттер-база, коллектор-база, коллектор-эмиттер, полупроводниковый резистор-изоляция от обратного напряжения, проходная ёмкость между общим выводом поликремниевых резисторов и коллектором  $n-p-n$ -транзистора.

На основе анализа результатов измерений, основные из которых показаны на рисунках 4–7, можно сделать следующие выводы:

а) нагревательные поликремниевые резисторы микросхем ПН002-01, ПН002-02 характеризуются относительно большим разбросом сопротивления между разными пластинами по сравнению с полупроводниковым резистором микросхемы ПН002-03. Так, среднее значение сопротивления составило для двух пластин:  $R_{НПКК} = 398,6$  (295,5) Ом для ПН002-01;  $R_{НПКК} = 264,4$  (213,3) Ом для ПН002-02;  $R_{НПП} = 318,8$  (328,2) Ом для ПН002-03;

б) температурный коэффициент сопротивления полупроводникового резистора (0,0019)

существенно больше, чем поликремниевый резистора (0,00071);

в) разность сопротивлений нагревательных резисторов в каждой микросхеме ТЭП менее 0,5 %, разность статического коэффициента усиления в схеме с общим эмиттером  $\beta = I_C/I_B$  двух  $n-p-n$ -транзисторов одной микросхемы ТЭП менее 1 %;

г) максимальная величина  $\beta$   $n-p-n$ -транзисторов достигается при коллекторном токе в диапазоне от 1 до 3 мА;

д) среднее значение температурного изменения напряжения на прямосмещённом эмиттерном переходе  $dV_{BE}/dT$  составляет минус 1,87 мВ/°С в диапазоне температур от 0 до 80 °С и минус 1,78 мВ/°С в диапазоне температур от 20 до 60 °С;

е) паразитные ёмкости нагревательных резисторов крайне малы, а именно составляют около 47 фФ для полупроводникового резистора и 96 фФ для поликремниевый резистора. Крайне малое значение паразитной ёмкости полупроводникового резистора делает нецелесообразным её дальнейшее уменьшение подачей обратного напряжения на вывод «изоляция»;

ж) транзисторы и резисторы имеют высокое пробивное напряжение, достаточное для работы микросхемы ТЭП при напряжении источников питания  $\pm 15$  В.

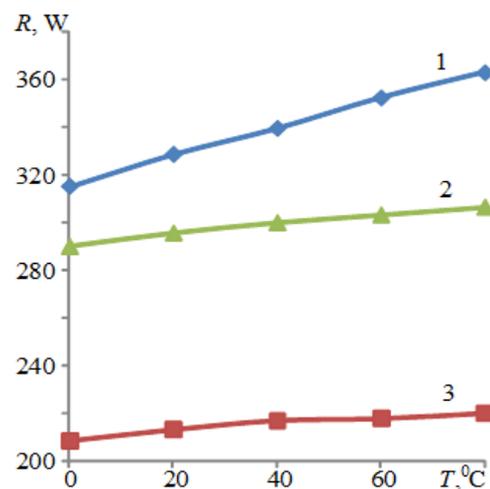
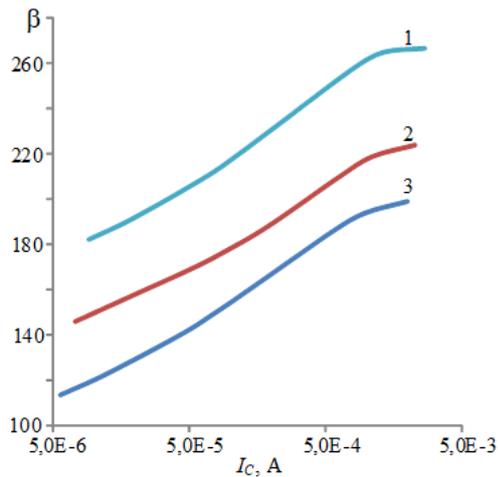


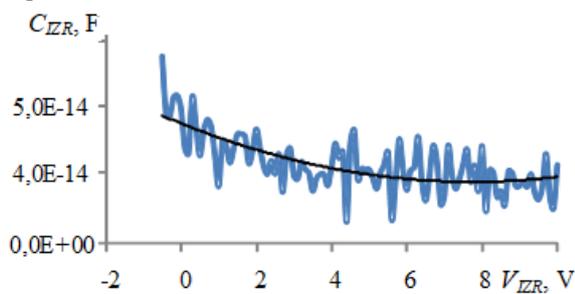
Рисунок 4 – Температурная зависимость сопротивления нагревательных резисторов: 1 – полупроводниковый; 2, 3 – поликремниевый с разным  $R_H$

Figure 4 – Temperature dependence of the resistance of heating resistors: 1 – semiconductor; 2, 3 – polysilicon with different  $R_H$



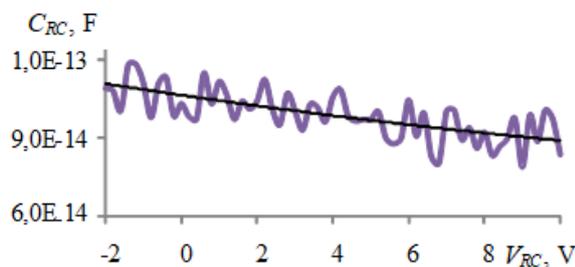
**Рисунок 5** – Зависимость  $\beta$   $n$ - $p$ - $n$ -транзистора термоэлектрического преобразователя от коллекторного тока  $I_C$  при разных температурах: 1 –  $T = 80$  °C; 2 –  $T = 20$  °C; 3 –  $T = 0$  °C

**Figure 5** – Dependence of  $\beta$  thermoelectric converter  $n$ - $p$ - $n$ -transistor on collector current  $I_C$  at different temperatures: 1 –  $T = 80$  °C; 2 –  $T = 20$  °C; 3 –  $T = 0$  °C



**Рисунок 6** – Зависимость ёмкости  $p$ - $n$ -перехода полупроводниковый резистор-изоляция от напряжения. Полиномиальная линия тренда описывается как  $y = 1,48 \cdot 10^{-16} \cdot x^2 - 2,28 \cdot 10^{-15} \cdot x + 4,74 \cdot 10^{-14}$

**Figure 6** – Dependence of the capacitance of the  $p$ - $n$  junction semiconductor resistor-insulation on voltage. A polynomial trend line is described as  $y = 1.48 \cdot 10^{-16} \cdot x^2 - 2.28 \cdot 10^{-15} \cdot x + 4.74 \cdot 10^{-14}$



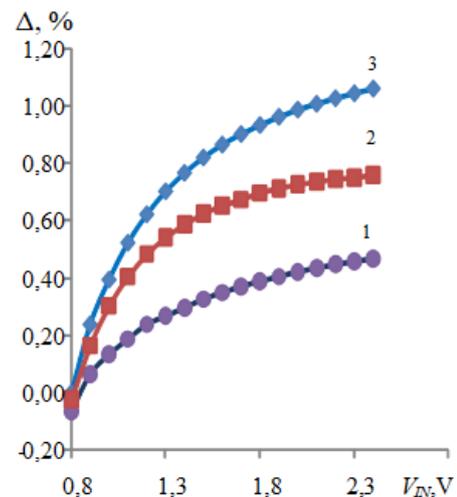
**Рисунок 7** – Зависимость ёмкости между поликремниевым резистором и коллектором от напряжения. Полиномиальная линия тренда описывается как  $y = 1,22 \cdot 10^{-17} \cdot x^2 - 6,99 \cdot 10^{-16} \cdot x + 9,55 \cdot 10^{-14}$

**Figure 6** – Dependence of the capacitance between the polysilicon resistor and the collector on voltage. The polynomial trend line is described as  $y = 1.22 \cdot 10^{-17} \cdot x^2 - 6.99 \cdot 10^{-16} \cdot x + 9.55 \cdot 10^{-14}$

## Измерительный преобразователь напряжения произвольной формы

Для изучения погрешности преобразования девять микросхем, по три образца каждого типа (ПН002-01, ПН002-02, ПН002-03), были подключены к ПСКЗ на рисунке 1 вместо РБПН001. Так как исследуемые микросхемы ТЭП располагались в контактирующем устройстве, имеющем паразитные ёмкости и индуктивности, то измерения погрешности ПСКЗ выполнялись на постоянном токе. При этом входной сигнал поступал от прецизионного универсального калибратора фирмы Transmille P3010A, выходное напряжение в узле OUTRMS на рисунке 1 регистрировалось с помощью вольтметра В7-72, компенсация напряжения смещения нуля ДУ на транзисторах VT1, VT2 выполнялась подачей постоянного напряжения на базу транзистора VT2 при входном напряжении, равном 0,8 В.

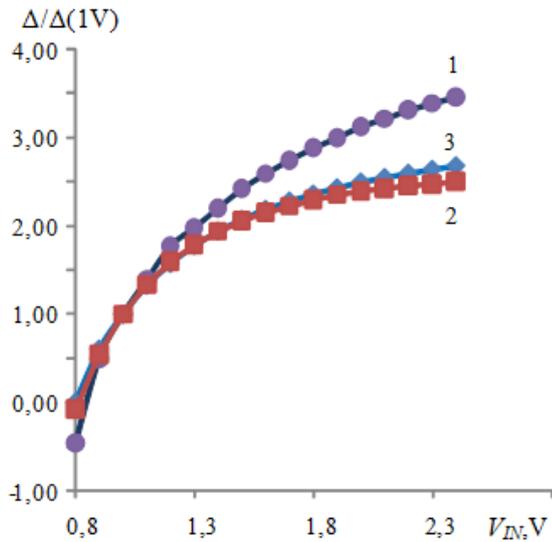
На рисунках 8, 9 приведены типовые зависимости погрешности и нормированной погрешности ПСКЗ от входного напряжения.



**Рисунок 8** – Зависимость погрешности преобразователя переменного напряжения на постоянном токе  $\Delta$  от входного напряжения  $V_{IN}$ : 1 –  $R_{HPPLY} = 133,5$  Ом; 2 –  $R_{HSI} = 318$  Ом; 3 –  $R_{HPPLY} = 267$  Ом

**Figure 8** – Dependence of alternating current voltage converter error at direct current  $\Delta$  on input voltage  $V_{IN}$ : 1 –  $R_{HPPLY} = 133.5$  Ohm; 2 –  $R_{HSI} = 318$  Ohm; 3 –  $R_{HPPLY} = 267$  Ohm

Заметим, что все ПСКЗ сохраняли работоспособность при входном напряжении 0,1 В, однако погрешность при этом была до 15 %, хотя в диапазоне от 0,3 до 2,4 В погрешность не превышала 1,6 %.



**Рисунок 9** – Зависимость нормированной погрешности преобразователя переменного напряжения на постоянном токе  $\Delta/\Delta(1V)$  от входного напряжения  $V_{IN}$ : 1 –  $R_{HPKK} = 133,5$  Ом; 2 –  $R_{HPII} = 318$  Ом; 3 –  $R_{HPKK} = 267$  Ом

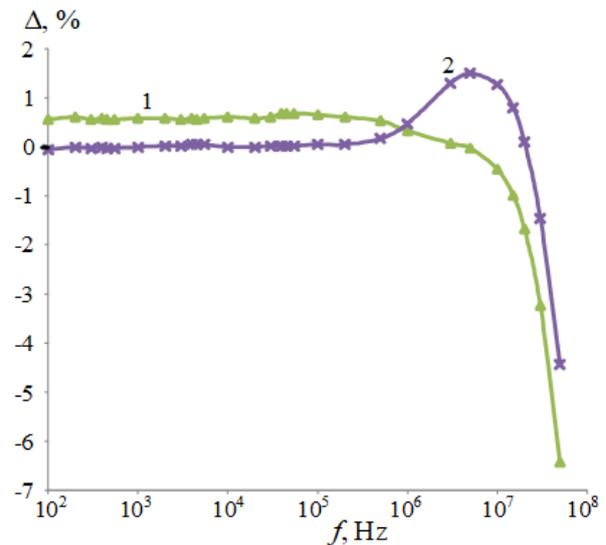
**Figure 9** – Dependence of the normalized alternating current voltage converter error at direct current  $\Delta/\Delta(1V)$  on the input voltage  $V_{IN}$ : 1 –  $R_{HPOLY} = 133.5$  Ohm; 2 –  $R_{HSI} = 318$  Ohm; 3 –  $R_{HPOLY} = 267$  Ohm

Дальнейшая модернизация ПСКЗ учитывала, что для применения в вольтметре ПСКЗ должен иметь высокое входное сопротивление. Увеличение входного сопротивления было достигнуто за счёт подключения между узлом In на рисунке 1 и источником сигнала входного усилителя напряжения, выполненного на микросхеме AD8132AR по схеме инвертирующего усилителя напряжения с коэффициентом усиления, равным 2. Микросхемы AD8132AR и ПН002-01 были распаяны на печатной плате, причём выход AD8132AR соединён с узлом In через корректирующую RC-цепь.

Результаты измерений, выполненных с помощью прибора для поверки вольтметров В1-16, подтверждают возможность уменьшения погрешности ПСКЗ в полосе частот при правильном выборе параметров корректирующей цепи (рисунок 10).

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать ряд выводов по направлениям модернизации измерительного преобразователя:

1. Для применения в вольтметре переменного тока электрическая схема ПСКЗ на рисунке 1 должна быть дополнена входным усилителем с большим входным сопротивлением, широкой полосой пропускания и высокой скоростью нарастания выходного напряжения при работе на нагрузку около 100 Ом.

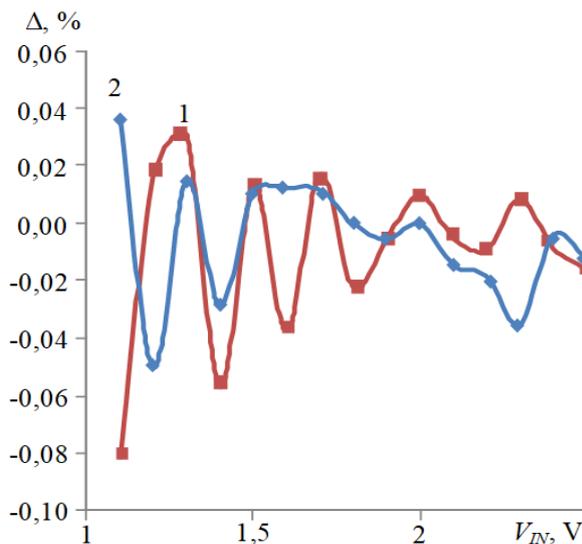


**Рисунок 10** – Зависимость погрешности преобразователя переменного напряжения с входным усилителем от частоты входного синусоидального сигнала при  $R_{HPKK} = 267$  Ом,  $V_{IN} = 2$  В: 1 – при отсутствии корректирующей цепи; 2 – с корректирующей цепью

**Figure 10** – Dependence of the alternating current voltage converter error with an input amplifier on the frequency of the input sinusoidal signal at  $R_{HPOLY} = 267$  Ohm,  $V_{IN} = 2$  V: 1 – in the absence of a correction circuit; 2 – with correction circuit

2. Известно, что современные широкополосные операционные усилители не являются прецизионными и характеризуются большим напряжением смещения нуля, которое уменьшается путём введения корректирующих цепей на потенциометрах. Введение нескольких цепей компенсации напряжения смещения нуля не целесообразно при производстве аппаратуры, т.к. увеличивает время и стоимость регулировочных операций и не устраняет температурное и временное изменение параметров. Кроме того, корректирующие цепи не позволяют существенно уменьшить зависимость погрешности ПСКЗ от уровня входного напряжения, показанную на рисунке 9. Для применения в вольтметре желательно

использование калибровки всего тракта от входа входного усилителя до выхода ПСКЗ, соединённого с аналого-цифровым преобразователем. Такая калибровка предполагает измерение СКЗ напряжения произвольной формы, сравнение его с выходным напряжением ПСКЗ для близкого по величине напряжения постоянного тока, определение погрешности ПСКЗ для напряжения постоянного тока, корректировку СКЗ напряжения произвольной формы с учётом найденной погрешности для постоянного тока (рисунок 11).

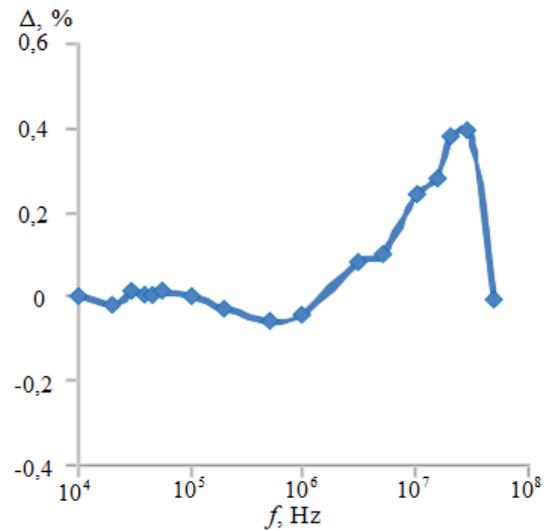


**Рисунок 11** – Погрешность преобразователя переменного напряжения ( $R_{HPKK} = 133,5$  Ом) с микросборкой термоэлектрического преобразователя и калибровкой в зависимости от входного напряжения на постоянном токе (кривая 1) и синусоидальном сигнале с частотой 10 кГц (кривая 2)

**Figure 11** – Alternating current voltage converter error ( $R_{HPOLY} = 133.5$  Ohm) with thermoelectrical converter micro-assembly and calibration depending on the input voltage at direct current (curve 1) and sinusoidal signal with a frequency of 10 kHz (curve 2)

3. Для уменьшения погрешности ПСКЗ в частотной области (рисунок 12) следует применять нагревательный резистор минимального сопротивления; уменьшить влияние паразитных параметров компонентов, например, распаяв микросборку ТЭП на печатной плате; оптимизировать схему включения входного усилителя за счёт выбора типа усилителя, его коэффициента усиления и цепей частотной коррекции, обеспечивающий требуемый запас по фазе;

согласовать выходное сопротивление входного усилителя с величиной  $R_H$ .



**Рисунок 12** – Погрешность преобразователя переменного напряжения с микросборкой термоэлектрического преобразователя ( $R_{HPKK} = 133,5$  Ом) и калибровкой в диапазоне частот при  $V_{IN} = 1,5$  В

**Figure 12** – Alternating current voltage converter error with thermoelectrical converter micro-assembly ( $R_{HPOLY} = 133.5$  Ohm) and calibration in the frequency range at  $V_{IN} = 1.5$  V

Как показано на рисунках 11, 12, проведённая по сформулированным направлениям модернизация ПСКЗ позволила уменьшить погрешность в полосе частот до 50 МГц более чем в 20 раз, а величина погрешности стала сравнима с погрешностью применяемых для исследований измерительных приборов.

## Заключение

Разработан измерительный преобразователь напряжения произвольной формы для широкополосного вольтметра переменного тока, обеспечивающий погрешность преобразования синусоидального сигнала менее 1 % в диапазоне от 20 Гц до 50 МГц.

Такая малая погрешность достигнута за счёт модернизации конструкции термоэлектрического преобразователя (применения поликремниевых нагревательных резисторов с сопротивлением около 130 Ом, размещения полупроводниковых кристаллов термоэлектрических блоков на полиимидной плёнке

в микросборке), изменения схемы частотной коррекции входного усилителя и введения автоматической калибровки выходного напряжения.

Разработанный измерительный преобразователь планируется использовать при создании в ОАО "МНИПИ" широкополосных вольтметров переменного тока.

## Список использованных источников

1. Нефедов, В.И. Метрология и радиоизмерения / В.И. Нефедов, А.С. Сигов, В.К. Битюков и др.; под ред. профессора В.И. Нефедова. – М. : Высшая школа, 2006. – 526 с.

2. Аминев, А.В. Измерения в телекоммуникационных системах: учебное пособие для вузов / А.В. Аминев, А.В. Блохин; под общей редакцией А.В. Блохина. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 223 с.

3. Дворников, О.В. Микроэлектронные преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения. Часть 2 / О.В. Дворников // Компоненты и технологии. – 2005. – № 1. – С. 34–39.

4. Дворников, О.В. Микроэлектронные преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения. Часть 1 / О.В. Дворников // Компоненты и технологии. – 2004. – № 9. – С. 62–69.

5. Дворников, О.В. Микроэлектронные преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения. Часть 3 / О.В. Дворников // Компоненты и технологии. – 2005. – № 2. – С. 84–93.

6. Klonz, M. Current developments in accurate AC-DC transfer measurements / M. Klonz // Proceedings of Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, Boulder, CO, USA. – 1994. – P. 358.

DOI: 10.1109/CPEM.1994.333360

7. Stott, H.L. A Multirange Standard for AC/DC Difference Measurements / H.L. Stott // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1986. – Vol. IM-35. – No. 4. – Pp. 387–391.

DOI: 10.1109/TIM.1986.6499103

8. Katzmann, F.L. Recent Improvements to an Automated Precision Wide-Band AC-DC Transfer Standard / F.L. Katzmann // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1987. – Vol. IM-36. – No 2. – Pp. 312–319. DOI: 10.1109/TIM.1987.6312693

9. Nicolae, D.V. Characterization and modeling of an RMS-DC solid-state thermal converter / D.V. Nicolae, E. Golovins // 2016 International Semiconductor Conference (CAS). – 2016. – Pp. 113–116.

DOI: 10.1109/SMICND.2016.7783055

10. Pogliano, U. Reconfigurable Unit for Precise RMS Measurements / U. Pogliano, B. Trinchera, F. Franccone // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Vol. 58, No. 4. – Pp. 827–831.

DOI: 10.1109/TIM.2008.2007054

11. Martincorena-Arraiza, M. A 1.2 V Current-Mode RMS-to-DC Converter Based on a Novel Two-Quadrant Electronically Simulated MOS Translinear Loop / M. Martincorena-Arraiza [et al.] // 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Seville, Spain. – 2020. – Pp. 1–1.

DOI: 10.1109/ISCAS45731.2020.9180764

12. Sharifipour, O. True RMS-DC converter based on Differential Difference Current Conveyor / O. Sharifipour [et al.] // 2015 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania. – 2015. – Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ISSCS.2015.7203936

13. Галкин, Я.Д. Прецизионный преобразователь переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения / Я.Д. Галкин, О.В. Дворников, В.А. Чеховский // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22. – № 1. – С. 30–38.

DOI: 10.35596/1729-7648-2024-22-1-30-38

## References

1. Nefedov VI, Sigov AS, Bityukov VK, Khakhin VI. Metrology and radio measurements. Moscow, Vysshaya shkola. 2006. 526 p.

2. Aminev AV, Blokhin AV. Measurements in Telecommunication Systems: A Textbook for Universities. Moscow, Izdatel'stvo Yurayt. 2024. 223 p.

3. Dvornikov OV. Microelectronic converters of alternating voltage to direct voltage by the level of root-mean-square value. Part 2. Components and technologies. 2005;(1):34-39. (In Russ.).

4. Dvornikov OV. Microelectronic converters of alternating voltage to direct voltage by the level of root-mean-square value. Part 1. Components and technologies. 2004;(9):62-69. (In Russ.).

5. Dvornikov OV. Microelectronic converters of alternating voltage to direct voltage by the level of root-mean-square value. Part 3. Components and technologies. 2005;(2):84-93. (In Russ.).

6. Klonz M. Current developments in accurate AC-DC transfer measurements. Proceedings of Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, Boulder, CO, USA, 1994;358. DOI: 10.1109/CPEM.1994.333360

7. Stott HL. A Multirange Standard for AC/DC Difference Measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1986;IM-35(4):387-391.

DOI: 10.1109/TIM.1986.6499103

8. Katzmann FL. Recent Improvements to an Automated Precision Wide-Band AC-DC Transfer Standard. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1987;IM-36(2):312-319.

**DOI:** 10.1109/TIM.1987.6312693

9. Nicolae DV, Golovins E. Characterization and modeling of an RMS-DC solid-state thermal converter. 2016 International Semiconductor Conference (CAS), 2016;113-116. **DOI:** 10.1109/SMICND.2016.7783055

10. Pogliano U, Trinchera B, Francone F. Reconfigurable Unit for Precise RMS Measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009;58(4):827-831. **DOI:** 10.1109/TIM.2008.2007054

11. Martincorena-Arraiza M, De La Cruz Blas CA, Algueta-Miguel JM, López-Martín A. A 1.2 V Current-

Mode RMS-to-DC Converter Based on a Novel Two-Quadrant Electronically Simulated MOS Translinear Loop. 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Seville, Spain, 2020;1-1.

**DOI:** 10.1109/ISCAS45731.2020.9180764

12. Sharifipoor O, Ahmadi A, Alirezaee S, Ahmadi M, Erfani S. True RMS-DC converter based on Differential Difference Current Conveyor. 2015 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania, 2015;1-4.

**DOI:** 10.1109/ISSCS.2015.7203936

13. Galkin YAD, Dvornikov OV, Tchekhovski VA. Precision RMS-to-DC Converter. BSUIR Reports. 2024;22(1):30-38. (In Russ.).

**DOI:** 10.35596/1729-7648-2024-22-1-30-38

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

## Аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ»

А.В. Казак, Л.В. Симончик

Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,  
пр-т Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 10.06.2024

Принята к печати 28.08.2024

Представлен аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ». От известных аналогов аппарат отличается компактностью, достигнутой за счёт отсутствия необходимости в использовании инертных газов (их заменяет окружающий воздух) и возможностью определения дозы воздействия. По своим характеристикам новинка соответствует мировому уровню. Отечественных аналогов нет. Приведены параметры и примеры использования данного прибора. Разработка будет востребована в сфере здравоохранения, ветеринарии, косметологии. Аппарат может быть применён для обеззараживания поверхностей, включая термочувствительные, такие как живые ткани, а также служить прототипом при разработке различных приборов физиотерапевтической направленности.

**Ключевые слова:** воздушная плазменная струя, аппарат «АЛОЭ», медицина, ветеринария

---

**Адрес для переписки:**

Казак А.В.  
Институт физики НАН Беларуси,  
пр-т Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.by

**Address for correspondence:**

Kazak A.V.  
B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences  
of Belarus  
Nezavisimosti Ave., 68-2, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.by

---

**Для цитирования:**

А.В. Казак, Л.В. Симончик.  
Аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ».  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 186–194.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

**For citation:**

A.V. Kazak, L.V. Simonchik  
Air Plasma Jet Generation Apparatus "ALOE".  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):186–194. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

## Air Plasma Jet Generation Apparatus "ALOE"

A.V. Kazak, L.V. Simonchik

*B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Nezavisimosti Ave., 68-2, Minsk 220072, Belarus*

Received 10.06.2024

Accepted for publication 28.08.2024

### Abstract

The article presents an apparatus for generating an air plasma jet "ALOE". The device differs from known analogues in its compactness achieved due to absence of need to use inert gases (because they are replaced by ambient air) and the ability to determine the exposure dose. In terms of its characteristics this new product corresponds to world standards. There are no domestic analogues of it. Parameters and examples of using this device are presented. It will be in demand for healthcare, veterinary medicine, and cosmetology. The device can be used for disinfection of surfaces, including heat-sensitive ones, such as living tissues, and can serve as a prototype for development of various physiotherapeutic devices.

**Keywords:** air plasma jet, apparatus "ALOE", medicine, veterinary medicine

---

#### Адрес для переписки:

Казак А.В.  
Институт физики НАН Беларуси,  
пр-т Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.b

#### Address for correspondence:

Kazak A.V.  
B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences  
of Belarus  
Nezavisimosti Ave., 68-2, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.by

---

#### Для цитирования:

А.В. Казак, Л.В. Симончик.  
Аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ».  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 186–194.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

#### For citation:

A.V. Kazak, L.V. Simonchik  
Air Plasma Jet Generation Apparatus "ALOE".  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):186–194. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

## Введение

За последние 20 лет проведено множество исследований плазменных струй атмосферного давления как для фундаментального понимания плазменного разряда, так и для их потенциальных приложений [1–6, 7]. Способность производить «холодную» плазму в условиях атмосферного давления была основой для быстрого роста применения плазмы в биомедицине [8–12]. Плазма обладает рядом свойств, таких как заряженные частицы, электрический ток, ультрафиолетовое излучение, температура, активные молекулы, радикалы и метастабильности, которые могут действовать синергетически [1–4]. Противовоздушные, противомикробные, противовоспалительные, стимулирующие ткани, усиливающие кровоток и проапоптотические эффекты, продемонстрированы в экспериментах *in vivo* и *in vitro*, и до сих пор не наблюдалось устойчивости патогенов к плазменной обработке [9–14]. Сочетание различных биологически активных компонентов и их широкий спектр положительного воздействия на различные заболевания делает плазму привлекательной для применения в медицине.

На данный момент сертифицированы как медицинский продукт для лечения хронических ран у людей следующие устройства: DBD PlasmaDerm® VU-2010 (CINOGY Technologies GmbH, Германия) [15], струя плазмы атмосферного давления (APPJ) kINPen® MED (INP Greifswald/neoplas tools GmbH, Германия) [16] и SteriPlas (Adtec Ltd., Лондон, Великобритания) [17], которые показали эффективность и хорошую переносимость у пациентов.

Для инициирования холодных плазменных струй повсеместно используется диэлектрический барьерный разряд в различных частотных диапазонах со значительно различающимися иницирующими напряжениями и скоростями потока плазмообразующих газов (воздух, гелий, аргон, их смесей с кислородом, азотом). Основным биоактивным компонентом в этих струях является озон. Другие биоактивные компоненты (в том числе и азотные) в этих струях образуются уже при распространении струи в окружающем воздухе вне разрядной камеры. Это приводит к невозможности резуль-

татов исследований различных авторов вследствие различающейся геометрии экспериментальных установок, дизайна физико-биологических экспериментов, отсутствия стандартизированных методик облучения, отсутствия контроля и сравнения электрических характеристик различных объектов, а также влияния внешней среды и других неконтролируемых факторов.

В Институте физики НАН Беларуси разработан аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ» на основе тлеющего микроразряда в воздушной среде. Основными биоактивными компонентами воздушной плазменной струи являются NO, NO<sub>2</sub> и HNO<sub>2</sub>. Известно, что окись азота (NO) является универсальным регулятором множества биологических и физиологических процессов, обладает антибактериальной активностью при воспалении, стимулирует местный иммунитет, ингибирует процессы свободнорадикального окисления. Окись азота управляет как внутриклеточными, так и межклеточными процессами в живой клетке. Такие болезни как гипертония, ишемия миокарда, тромбозы вызваны в том числе нарушением физиологических процессов, которые регулирует окись азота [18].

В данной работе представлено описание аппарата генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ» и его характеристики. Приведены рекомендации по его использованию для обработки различных объектов.

## Устройство и принцип работы аппарата генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ»

Аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ» состоит из источника питания, компрессора, разрядной камеры и гибкого металлического шланга, внутри которого проходит трубка для подачи воздуха и высоковольтный провод. Принцип работы аппарата заключается в зажигании и поддержании в стабильном состоянии тлеющего электрического микроразряда между двумя электродами в разрядной камере, через которую осуществляется непрерывная продувка воздуха. Внешний вид аппарата представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Фотография аппарата для генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ»

Figure 1 – Photo of the device for generating an air plasma jet "ALOE"

На панели управления расположен дисплей, кнопки уменьшения/увеличения выходного тока, кнопки уменьшения/увеличения времени обработки, кнопка запуска/остановки. Выходной ток можно выбирать из ряда значений 30, 35 и 40 мА. Время работы можно устанавливать от 1 до 20 мин с шагом 1 мин. В нижней части

дисплея индуцируется зелёная полоса, которая отображает продолжительность времени предварительного прогрева или охлаждения разрядной камеры.

Схема аппарата генерации воздушной плазменной струи приведена на рисунке 2. Разрядное устройство представляет собой кварцевую цилиндрическую разрядную камеру с внутренним диаметром 8 мм, внутри которой соосно расположены закругленный катод (стержень диаметром 6 мм) и плоский анод толщиной 4 мм, изготовленные из нержавеющей стали. Межэлектродный промежуток можно варьировать до 1 мм. Через разрядную камеру осуществляется постоянный поток воздуха, расход которого до 3 л/мин можно регулировать с помощью компрессора. Воздух подаётся через полость в катод, а выходит через отверстие диаметром 1,5 мм в середине анода.

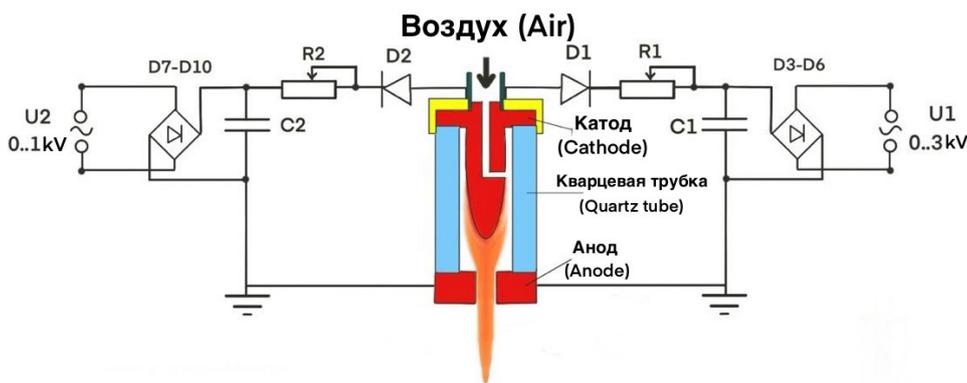


Рисунок 2 – Схема устройства генерации воздушной плазменной струи на постоянном токе в двухэлектродной конфигурации

Figure 2 – Scheme of a device for generating an air plasma jet at direct current in a two-electrode configuration

Для питания микроразряда используется два источника питания постоянного тока. Первый источник  $U_1$  – напряжением до 3 кВ. Данное значение напряжения больше, чем напряжение пробоя для межэлектродного промежутка, например, 0,7 мм в воздухе при атмосферном давлении. Задача этого источника питания – обеспечить зажигание и непрерывное поддержание микроразряда при разрядном токе около 5 мА. Для увеличения тока разряда до 50 мА используется источник  $U_2$  с постоянным напряжением до 1,5 кВ. Развязка источников питания осуществляется при помощи диодов  $D_1$  и  $D_2$ .

## Характеристики плазменной струи

Химический состав воздушных плазменных струй зависит от температуры газа в области разряда [19]. Плазменные струи, генерируемые тлеющим микроразрядом в воздухе, характеризуются повышенной температурой, содержат азотные бактерицидные компоненты NO, NO<sub>2</sub> и HNO<sub>2</sub> [20, 21].

Основное производство монооксида азота происходит в неравновесной плазме тлеющего микроразряда, где N, O и OH образуются в плазмохимических реакциях с участием электронов. Принимая во внимание измеренную

температуру газа 1600 К, типичную плотность  $10^{12}$ – $10^{13}$  см<sup>-3</sup> и среднюю энергию электронов 1 эВ для разряда в молекулярных газах при токе 30 мА, анализ показывает, что эти процессы более эффективны, чем термическая диссоциация молекул азота, кислорода и воды. Кроме того, недостаточно высокая температура в разряде приводит к очень низкой скорости реакции атомов кислорода с молекулами азота. Поэтому образование NO не может быть правильно описано в рамках теплового механизма Зельдовича и требует кинетического анализа с учётом плазмохимических реакций.

Константа равновесия для реакции окисления оксида азота до диоксида азота составляет 0,0085 при температуре 1600 К и повышается при температуре ниже 800 К. Увеличение концентрации NO<sub>2</sub> начинается со снижения температуры вдоль оси разряда в разрядной камере и продолжается в струе.

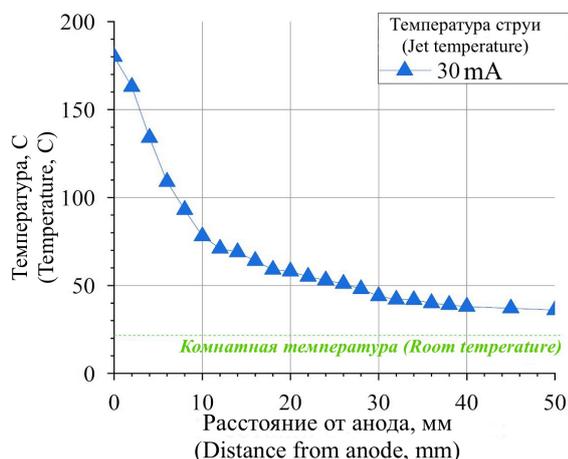
Молекулы азотистой кислоты, участвующие в реакции  $\text{HNO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{OH} + \text{NO} + \text{M}$ , менее термически устойчивы, чем молекулы диоксида азота. Поэтому образование азотистой кислоты происходит при низких температурах за пределами зоны микроразряда.

В низкотемпературной зоне струи тлеющего микроразряда, где процесс дис-

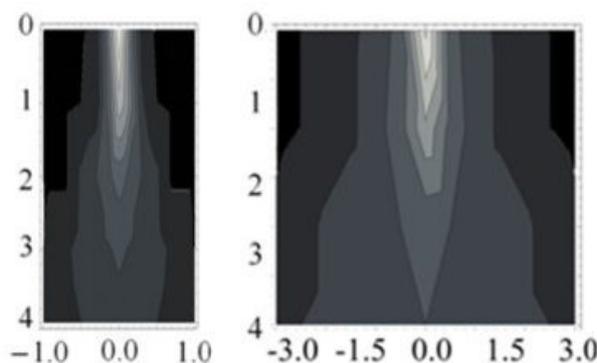
социации неэффективен, образования заметной концентрации озона не происходит, поскольку ранее быстрая трёхчастичная реакция образования NO<sub>2</sub> «отнимает» атомы кислорода, необходимые для образования O<sub>3</sub>. Возникающие молекулы озона погибают в столкновениях с молекулами оксида азота и диоксида азота, уже имеющими значительную концентрацию.

Как показано в работе [22] профили распределения потока и температуры сильно меняются в зависимости от того, истекает струя в открытое пространство или на какой-то барьер, например, чашку Петри.

На рисунке 3 представлены пространственные профили температуры в случае струи, истекающей в открытое пространство (рисунок 3b) и на преграду (рисунок 3c) при одинаковом расходе газа 5 л/мин. Видно, что профиль газовой температуры струи при наличии преграды становится шире в 3 раза, распределение температуры газа приобретает колоколообразную форму. Такая форма распределения, вероятно, связана с растеканием струи вдоль поверхности чашки Петри, нагревом её и с восходящими горячими потоками, что требует дополнительных ограничений по температуре газа для работы с живыми объектами.



a



b

c

**Рисунок 3** – Аксиальное распределение температуры газа в струе от расстояния от анода (a) и пространственные профили температуры в случае истекания струи в открытое пространство (b) и в случае истекания струи на барьер (c) при потоке 5 л/мин, токе 30 мА

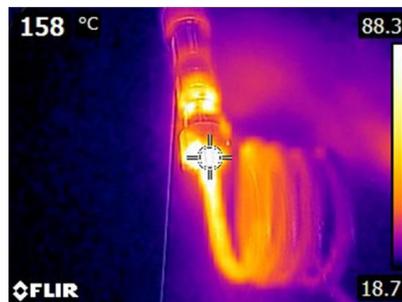
**Figure 3** – Axial distribution of gas temperature in the jet depending on the distance from the anode (a) and spatial temperature profiles at a flow of 5 l/min, a current of 30 mA in the case of a jet flowing into open space (b) and in the case of a jet flowing onto a barrier (c)

Для уменьшения температуры выхлопа предложено использовать протяжённый канал для доставки долгоживущих компонентов плазменной струи к области обработки. Для

этого использовалась медная трубка с внешним диаметром 6 мм и общей протяжённостью около полуметра, которая для удобства изогнута в виде спирали (рисунок 4а).



a



b

**Рисунок 4** – Фотография наконечника с тепло-рассеивателем (a) и его ИК-снимок (b)

**Figure 4** – Photo of the nozzle with a heat dissipator (a) and its IR image (b)

Спираль фиксировалась на внешней части разрядной камеры с помощью специального наконечника и выполняла роль тепло-рассеивателя (рисунок 4b). Газ, выходя из разрядной камеры, охлаждался по мере движения вдоль медной трубки до комнатной температуры без заметного изменения концентрации долгоживущих ИК-активных компонентов плазмы.

Концентрация бактерицидных компонент воздушной плазменной струи определялась методом абсорбционной ИК-спектроскопии. Спектры поглощения регистрировались с по-

мощью ИК Фурье-спектрометра Nexus (Thermo-Nicolet) с газовой кюветой 186-0305 (Perkin-Elmer). Оптический путь газовой кюветы составлял 135 см. Вся плазменная струя с отверстия в аноде направлялась с помощью силиконовой трубки в кювету. Вычисление спектров поглощения осуществлялось с использованием базы спектральных данных HITRAN [23]. Мольные доли бактерицидных компонент на выходе из отверстия в аноде разрядной камеры при различных условиях приведены в таблице.

Таблица /Table

### Параметры воздушной плазменной струи

#### Parameters of the air plasma jet

Параметры разряда Discharge parameters		NO, ppm	NO <sub>2</sub> , ppm	HNO <sub>2</sub> , ppm
1	Разрядный промежуток 0,5 мм / Discharge gap 0.5 mm			
	Сила тока 30 мА / Current 30 mA			
	Расход воздуха 1,5 л/мин / Air flow 1.5 l/min	500±25	250±25	50±5
Диаметр вых. отверстия 4,0 мм / Outlet diameter holes 4.0 mm				
2	Разрядный промежуток 0,5 мм / Discharge gap 0.5 mm			
	Сила тока 30 мА / Current 30 mA			
	Расход воздуха 1,5 л/мин / Air flow 1.5 l/min	335±25	140±25	15±5
Диаметр вых. отверстия 0,25 мм / Outlet diameter holes 0.25 mm				

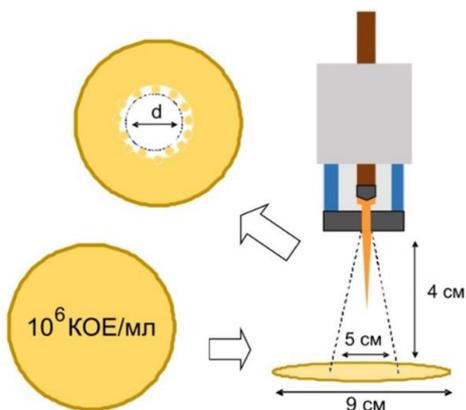
Образующиеся мольные доли NO, NO<sub>2</sub> и HNO<sub>2</sub> в воздушной плазменной струе тлеющего микро-разряда атмосферного давления

экспоненциально убывают с расстоянием от анода и на расстоянии 4 см составляют около 40 ppm, 20 ppm и 10 ppm, соответственно.

## Примеры применения аппарата «АЛОЭ»

### Обработка чашек Петри в открытой атмосфере

Схема эксперимента представлена на рисунке 5. Разрядная камера закрепляется вертикально на лабораторном штативе (или другом держателе) таким образом, чтобы расстояние от выходного отверстия струи до поверхности было не менее 4 см. Установить чашку Петри таким образом, чтобы её центральная часть располагалась напротив отверстия выхода струи.



**Рисунок 5** – Схема эксперимента с обработкой чашек Петри

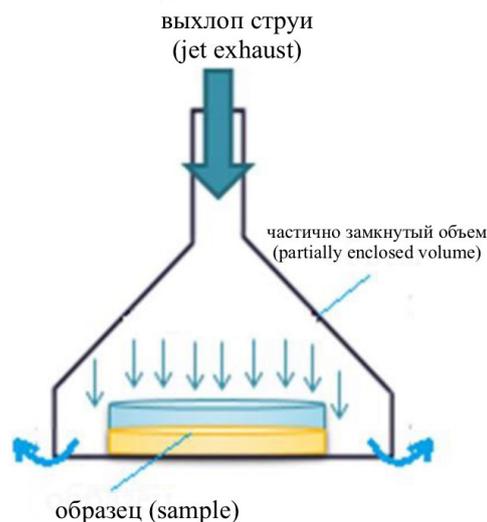
**Figure 5** – Scheme of the experiment with the treatment of Petri dishes

Установить на дисплее ток 30 мА и необходимое время обработки. Снять крышку с чашки Петри. Нажатием клавиши «Пуск-Стоп» включить аппарат «АЛОЭ».

После выключения разряда (короткий звук) закрыть чашку Петри и снять её для дальнейшего исследования.

### Обработка изделий в частично замкнутом объёме

Схема эксперимента с обработкой изделий в частично замкнутом объёме представлена на рисунке 6. Изделие сложной формы, которое необходимо обработать, следует разместить на плоскую поверхность и накрыть ёмкостью в виде колпака. Выхлоп струи направить в объём-колпак сверху. Выход газов будет происходить через неровности прилегания колпака к поверхности.



**Рисунок 6** – Схема эксперимента с обработкой изделий в частично замкнутом объёме

**Figure 6** – Scheme of the experiment with treatment the product in a partially closed state

Установить на дисплее ток 30 мА и необходимое время обработки.

Нажатием клавиши «Пуск-Стоп» включить аппарат «АЛОЭ». После выключения разряда достать изделие для дальнейшего исследования.

### Обработка ран

Установить на дисплее ток 30 мА и необходимое время обработки. Нажатием клавиши «Пуск-Стоп» включить аппарат «АЛОЭ». После короткого сигнала включения основного разряда взять разрядную камеру в руку, как показано на рисунке 7, и поднести к участку тела, который следует обработать.



**Рисунок 7** – Схема эксперимента с обработкой изделий в частично замкнутом объёме

**Figure 7** – Scheme of the experiment with treatment the product in a partially closed state

Следить за тем, чтобы расстояние от отверстия выхлопа струи до объекта было не менее 4 см. Непрерывно перемещать разрядную камеру над обрабатываемой поверхностью раны. После выключения разряда (короткий звук) поместить разрядную камеру на подставку из негорючего материала.

### Доза воздействия (облучения) и давление на объект обработки

При любом клиническом применении плазмы в качестве метода лечения определение дозы и её количественная оценка и, наконец, количественная связь дозы с медицинской эффективностью являются некоторыми из проблем плазменных струй, особенно, на основе барьерных разрядов. Немаловажным фактором является и давление, которое оказывает струя на обрабатываемый участок поверхности живого организма.

Проведем оценку давления струи для двух случаев: *A* – к спиральному теплорассеивателю присоединена силиконовая трубка с внутренним диаметром  $d_1 = 4$  мм и *B* – в другой конец силиконовой трубки вставлена игла с внутренним диаметром  $d_2 = 0,25$  мм.

Давления струи  $p$  рассчитывалось по формуле:

$$p = \rho v^2 / 2.$$

При 20 °С, атмосферном давлении 101,325 кПа и сухом воздухе плотность атмосферы составляет  $\rho \approx 1,2041$  кг/м<sup>3</sup>.

Случай *A* – при внутреннем диаметре трубки  $d_1 = 4$  мм при измеренном расходе воздуха  $w_1 \approx 1,5$  л/мин скорость струи  $v_1 \approx 2$  м/с. Тогда давление струи на выходе из трубки составит около  $p_1 = 2,4$  Па.

Случай *B* – при внутреннем диаметре иглы  $d_2 = 0,25$  мм при измеренном расходе воздуха  $w_2 \approx 0,15$  л/мин скорость струи  $v_2 \approx 50$  м/с. Тогда давление струи на выходе из трубки составит около  $p_2 = 1500$  Па.

При воздействии на образцы доза будет определяться количеством активных частиц в потоке за время воздействия. Оценку числа частиц на выходе трубки и иглы за секунду будем производить по формуле:

$$N_x = w / 60 * N_L * \text{ppm}_x,$$

где  $w$  – расход воздуха в л/мин;  $N_L$  – число

Лошмидта;  $\text{ppm}_x$  – мольные доли активных частиц из таблицы.

Случай *A*:  $N_{\text{NO}} \approx 3,4 \cdot 10^{17}$  частиц/с,  
 $N_{\text{NO}_2} \approx 1,7 \cdot 10^{17}$  частиц/с,  $N_{\text{HNO}_2} \approx 3,4 \cdot 10^{16}$  частиц/с.

Случай *B*:  $N_{\text{NO}} \approx 2,3 \cdot 10^{16}$  частиц/с,  
 $N_{\text{NO}_2} \approx 9,5 \cdot 10^{15}$  частиц/с,  $N_{\text{HNO}_2} \approx 1,0 \cdot 10^{15}$  частиц/с.

Параметры расхода газа подбирались исходя из получения стабильного режима работы аппарата. В случае истекания большого потока (1,5 л/мин) через большее отверстие (4 мм) (случай ламинарной струи) имеется большее содержание биоактивных азотных частиц, что вероятно связано с большим пребыванием газа в области разряда. Во втором случае (0,25 л/мин, 0,25 мм) реализуется случай сильно турбулентной струи с содержанием частиц на 2 порядка меньше первого случая, при этом в первом случае соотношение  $\text{NO}/\text{NO}_2$  составляет 2, во втором около 2,4.

### Заключение

На основе тлеющего микрозаряда в воздухе разработан и изготовлен опытный образец – аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ». Основными компонентами воздушной плазменной струи при расходе воздуха 1,5 л/мин и разрядном токе 30 мА являются  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{HNO}_2$  с мольными концентрациями 500 ppm, 350 ppm и 50 ppm, соответственно. От известных мировых аналогов аппарат отличается компактностью, достигнутой за счёт отсутствия необходимости в использовании инертных газов – их заменяет окружающий воздух – и возможностью определения дозы воздействия. По своим характеристикам новинка соответствует мировому уровню. Отечественных аналогов нет. Предложено определение дозы для такого типа воздействия на различные объекты, которое формируется из количества (т. е. концентрации) биологически активных молекул на единицу времени воздействия на обрабатываемый объект.

Разработка будет востребована в сфере здравоохранения, ветеринарии, косметологии при получении соответствующих сертификатов и разрешений. Аппарат может быть применен для обеззараживания поверхностей, включая термочувствительные, такие как живые ткани, а также служить прототипом при разработке различных приборов физиотерапевтической направленности. В настоящее время готовится

программа и методика клинических испытаний для применений в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии.

## Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Ф22СРБГ-006).

## Acknowledgments

The work was carried out with partial support from the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant F22SRBG-006).

## References

1. Schutze A. [et al.] The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1998;26(16):85-94. **DOI:** 10.1109/27.747887
2. Lu X, Laroussi M. and Puech V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2012;21:034005. **DOI:** 10.1088/0963-0252/21/3/034005
3. Winter J, Brandenburg R. and Weltmann K-D. Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2015;24:064001. **DOI:** 10.1088/0963-0252/24/6/064001
4. Lu X. and Ostrikov K. Guided ionization waves: The physics of repeatability. *Appl. Phys. Rev.*, 2018;5:031102. **DOI:** 10.1063/1.5031445
5. Morabit Y. [et al.] A review of the gas and liquid phase interactions in low-temperature plasma jets used for biomedical applications. *Eur. Phys. J.D*, 2021;75(32). **DOI:** 10.1140/epjd/s10053-020-00004-4
6. Lu X. [et al.] Cold atmospheric-pressure air plasma jet: Physics and opportunities. *Phys. Plasmas*, 2021;28:100501. **DOI:** 10.1063/5.0067478
7. Kong MG, Ganguly BN. and Hicks RF. Plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2012;21:030201. **DOI:** 10.1088/0963-0252/21/3/030201
8. Sadowska JM. [et al.] Plasma medicine: The great prospects when physics meets medicine. *Europhysics News*, 2022;53(3):20-23. **DOI:** 10.1051/eprn/2022303
9. Laroussi M. Sterilization of contaminated matter with an atmospheric pressure plasma. *IEEE Trans Plasma Sci.*, 1996;24:1188–91. **DOI:** 10.1109/27.533129
10. Kelly-Wintenberg K. [et al.] Room temperature sterilization of surfaces and fabrics with a one atmosphere uniform glow discharge plasma. *J Indust Microbiol Biotechnol.*, 1998;20:69-74. **DOI:** 10.1038/sj.jim.2900482
11. Laroussi M. [et al.] Images of biological samples undergoing sterilization by a glow discharge at atmospheric pressure. *IEEE Trans Plasma Sci.*, 1999;27:34-5. **DOI:** 10.1109/27.763016
12. Laroussi M. Non-Thermal decontamination of biological media by atmospheric pressure plasmas: review, analysis, and prospects. *IEEE Trans Plasma Sci.*, 2002;30:1409-15. **DOI:** 10.1109/TPS.2002.804220
13. Isbary G. [et al.] A first prospective randomized controlled trial to decrease bacterial load using cold atmospheric argon plasma on chronic wounds in patients. *Br.J. Dermatol.* 2010;163:78. **DOI:** 10.1111/j.1365-2133.2010.09744.x
14. Laroussi M. From killing bacteria to destroying cancer cells: twenty years of plasma medicine. *Plasma Process Polym.*, 2014;11:1138-41. **DOI:** 10.1002/ppap.201400152
15. Wandke D. “PlasmaDerm®-based on di\_CAP technology”, In book: “Comprehensive Clinical Plasma Medicine”, 2018;495-502. **DOI:** 10.1007/978-3-319-67627-2\_33
16. [Electronic Resource]. Available at: <https://neoplas-med.eu/produkt/> [Accessed 31.05.2024].
17. [Electronic Resource]. Available at: <https://adtechhealthcare.com/adtec-steriplas/> [Accessed 31.05.2024].
18. Butenko AV. [et al.] Review of clinical applications of nitric oxide-containing air-plasma gas flow generated by Plason device. *Clinical Plasma Medicine*. 2020;19-20:100112. **DOI:** 10.1016/j.cpme.2020.100112
19. Arkhipenko VI. [et al.] Mechanisms underlying the formation of inactivation components of an air dc plasma jet. *High Temperature Material Processes*. 2018;22(4):273-278. **DOI:** 10.1615/HighTempMatProc.2018029287
20. Kazak AV. [et al.] Bactericidal Components in Helium and Air Plasma Jets of a Dielectric Barrier Discharge. *Journal of applied spectroscopy*. 2021;88:293-298. **DOI:** 10.1007/s10812-021-01172-w
21. Kazak AV. [et al.] Inactivation of Consortiums of Microorganisms by an Air Plasma Jet at Atmospheric Pressure. *Plasma Medicine*. 2017;7(2):109-115. **DOI:** 10.1615/PlasmaMed.2017019263
22. Stepanova OM. [et al.] Spatial Distribution of Gas Temperature in an Air Plasma Jet of Direct Current Glow Microdischarge. *Tech. Phys. Lett.*, 2018;44:841-843. **DOI:** 10.1134/S1063785018090304
23. Kazak AV. [et al.] Bactericidal Components Diagnostics of Air Plasma Jets by IR and UV Absorption Spectroscopy. *Journal of applied spectroscopy*, 2024;91(3):352-360. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-195-204

## Модифицированный метод TRIAD для решения задачи ориентации подвижного объекта

В.В. Матвеев, М.Г. Погорелов, А.Н. Хомячкова

Тульский государственный университет,  
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия

Поступила 17.07.2024

Принята к печати 08.09.2024

В настоящее время актуальным является создание систем ориентации подвижных объектов, основанных на комплексировании различных типов датчиков первичной информации. Одним из способов решения задачи ориентации является использование метода *TRIAD* (*Tri-Axial Attitude Determination*), позволяющего определить матрицу направляющих косинусов между двумя системами координат. Традиционный метод *TRIAD* базируется на использовании двух опорных векторов – силы тяжести и геомагнитного поля, измеряемых акселерометрами и магнитометрами соответственно. Недостатком данного метода являются существенные возмущения при ускоренном движении объекта и влияние случайных погрешностей датчиков первичной информации. В работе предложен модифицированный метод *TRIAD*, базирующийся на измерениях трёх триад датчиков: магнитометров, акселерометров и гироскопов. На основе измерений гироскопов формируются оценки векторов ускорения силы тяжести и геомагнитного поля, которые затем комплексуются с показаниями акселерометров и магнитометров. Комплексированные векторы ускорения силы тяжести и геомагнитного поля используются затем для формирования матрицы направляющих косинусов по методу *TRIAD*. Метод может быть полезен для реализации бесплатформенных систем ориентации подвижных объектов различного базирования, так как в 6–8 раз точнее по сравнению с классическим методом *TRIAD*. Степень ослабления случайных погрешностей датчиков и возмущений от ускорений объекта может настраиваться весовыми коэффициентами.

**Ключевые слова:** метод TRIAD, магнитометр, акселерометр, гироскоп

---

**Адрес для переписки:**

Матвеев В.В.

Тульский государственный университет,  
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия  
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

**Address for correspondence:**

Matveev V.V.

Tula State University,  
Lenina Ave., 92, Tula 300012, Russia  
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

---

**Для цитирования:**

В.В. Матвеев, М.Г. Погорелов, А.Н. Хомячкова.  
Модифицированный метод TRIAD для решения задачи ориентации подвижного объекта.

Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 195–204.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-195-204

**For citation:**

Matveev VV, Pogorelov MG, Khomyachkova AN.  
Modified TRIAD Method for Solving the Problem of a Moving Object Orientation.

Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):195–204. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-195-204

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-195-204

## Modified TRIAD Method for Solving the Problem of a Moving Object Orientation

V.V. Matveev, M.G. Pogorelov, A.N. Khomyachkova

Tula State University,  
92 Lenin Ave., 92, Tula 300012, Russia

Received 17.07.2024

Accepted for publication 08.09.2024

### Abstract

Currently, it is relevant to create moving objects orientation systems based on the integration of various types of primary information sensors. One way to solve the orientation problem is to use the TRIAD (Tri-Axial Orientation Determination) method which allows determining the matrix of direction cosines between two coordinates. The traditional TRIAD force method is based on the use of two reference vectors – of gravitational and geomagnetic fields, measured by accelerometers and magnetometers, respectively. The disadvantage of this method is – appearance of additional deviations during the accelerated movement of the object and influence of primary information sensors' random errors. Modified TRIAD method which is based on measurements of three triads of sensors: magnetometers, accelerometers and gyroscopes was proposed in the article. Estimates of acceleration vectors of gravitational and geomagnetic fields were calculated taking into account gyroscope measurements. Then these estimates were combined with the accelerometers' and magnetometers' data. The complex gravitational and geomagnetic fields' accelerations were used to form the direction cosine matrix by the TRIAD method. The suggested modified method can be used to implement free-form moving objects' orientation systems, since it is 6–8 times more accurate compared to the classic TRIAD method. Attenuation of random sensor errors and disturbances due to object acceleration can be adjusted by use of weigh factors.

**Keywords:** TRIAD method, magnetometer, accelerometer, gyroscope

---

#### Адрес для переписки:

Матвеев В.В.  
Тульский государственный университет,  
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия  
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

#### Address for correspondence:

Matveev V.V.  
Tula State University,  
Lenina Ave., 92, Tula 300012, Russia  
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

---

#### Для цитирования:

В.В. Матвеев, М.Г. Погорелов, А.Н. Хомячкова.  
Модифицированный метод TRIAD для решения задачи ориентации подвижного объекта.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 195–204.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-195-204

#### For citation:

Matveev VV, Pogorelov MG, Khomyachkova AN.  
Modified TRIAD Method for Solving the Problem of a Moving Object Orientation.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):195–204. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-195-204

## Введение

Триады магнитометров, гироскопов и акселерометров являются ключевыми компонентами систем ориентации и навигации подвижных объектов различного базирования: космических аппаратов, воздушных судов, наземных робототехнических комплексов и др. Магнитометрические датчики позволяют измерять проекции напряжённости магнитного поля Земли и использовать эти данные для определения магнитного курса подвижного объекта [1]. Выполняя комплексирование магнитометров с акселерометрами, измеряющими проекции вектора кажущегося ускорения, можно создать систему, способную определять ориентацию объекта вокруг трёх осей [2]. Эффективным способом определения ориентации объекта является метод *TRIAD* (*Tri-Axial Attitude Determination* – Трёхосное определение ориентации [3]), позволяющий рассчитать матрицу направляющих косинусов между неподвижной и связанной с подвижным объектом системами координат, по наблюдению за проекциями двух опорных векторов [4]. Метод *TRIAD* широко применяется для определения ориентации космических аппаратов [3–6], где в качестве опорных векторов используются измерения магнитометрических и звёздных датчиков, в задаче исследования штопора модели самолёта по векторам геомагнитного и гравитационного полей [7], в задачах начальной выставки [8] инерциальных навигационных систем по векторам силы тяжести и угловой скорости суточного вращения Земли, для определения ориентации беспилотных летательных аппаратов [9].

Измерения компонент магнитного поля Земли искажаются инструментальными погрешностями магнитометров, которые разделяются на два типа: *Hard Iron* («твёрдое железо») и *Soft Iron* («мягкое железо»). Вопросам калибровки магнитометров, направленным на снижение данных типов погрешностей, существует обширная литература (например [10, 11]), поэтому в данной статье не рассматриваются.

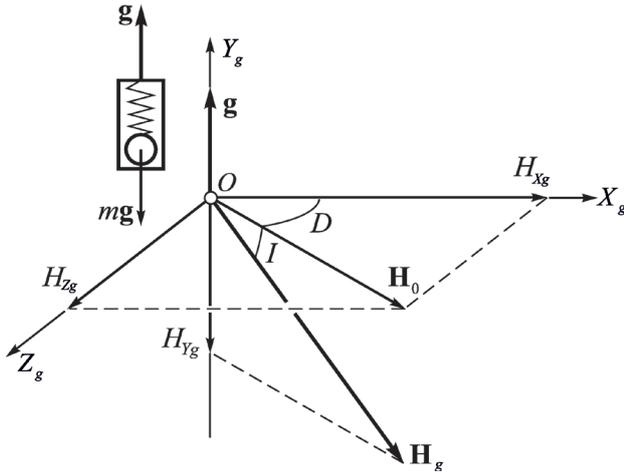
Особенностью функционирования акселерометров на подвижном объекте является то, что они измеряют не абсолютное ускорение, а, так называемое, кажущееся ускорение – геометрическую сумму абсолютного ускорения

объекта и ускорения силы тяжести [11]. При движении объекта без ускорений акселерометры можно использовать как датчики углов наклона объекта относительно плоскости горизонта, подобно двухкоординатному физическому маятнику. При движении объекта с ускорением, углы наклона, вырабатываемые акселерометрами, будут подвержены существенным возмущениям и без специальных мер погрешности определения углов могут составлять значительных величин. По этой причине использование классического метода *TRIAD* для решения задачи ориентации подвижного объекта по векторам напряжённости геомагнитного и гравитационных полей будет сопровождаться существенными погрешностями. Кроме того, на точность измерения параметров ориентации оказывают влияние случайные погрешности акселерометров и магнитометров.

В связи с этим целью настоящей работы являлось повышение точности классического метода *TRIAD* для снижения влияния на систему ориентации случайных погрешностей датчиков первичной информации и возмущений, вызванных ускорениями подвижного объекта.

## Задача ориентации подвижного объекта

Введём географическую систему координат, начало  $O$  которой поместим в центр масс подвижного объекта, а её оси направим по сторонам света:  $OX_g$  – на север,  $OY_g$  – по истинной вертикали вверх и  $OZ_g$  на восток соответственно (рисунок 1) [11]. Плоскость  $OX_gZ_g$  является плоскостью горизонта. Магнитное поле Земли определяется вектором напряжённости:  $\mathbf{H}_g = \|H_{X_g} \ H_{Y_g} \ H_{Z_g}\|^T$ , где  $H_{X_g}$  – северная,  $H_{Y_g}$  – вертикальная,  $H_{Z_g}$  – восточная составляющие соответственно. Проекция вектора  $\mathbf{H}_g$  на плоскость горизонта обозначим вектором  $\mathbf{H}_0$ , направление которого совпадает с плоскостью магнитного меридиана. Символами  $I, D$  обозначены углы наклона и склонения соответственно. На рисунке 1 показан также вектор ускорения силы тяжести, направленный вдоль оси  $OY_g$  и совпадающий с направлением линии отвеса. Вектор  $\mathbf{g}$  направлен вертикально для удобства интерпретации показаний акселерометров, так как смещению его чувствительного элемента вниз соответствует положительный сигнал об ускорении.

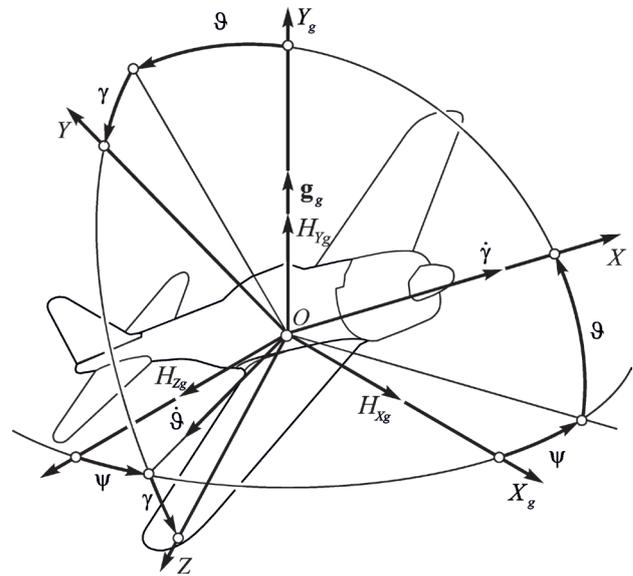


**Рисунок 1** – Географическая система координат  $OX_gY_gZ_g$  и компоненты вектора напряжённости магнитного поля Земли

**Figure 1** – Geographical coordinate system  $OX_gY_gZ_g$  and components of the Earth's magnetic field intensity vector

Введём связанную с подвижным объектом систему координат  $OXYZ$  (рисунок 2), в которой ось  $OX$  совпадает с продольной осью объекта и направлена к носу, ось  $OZ$  совпадает с поперечной осью и направлена в сторону правого крыла, ось  $OY$  перпендикулярна плоскости крыльев и направлена вверх. Положение строительных осей подвижного объекта относительно

географической системы координат определено тремя углами Эйлера–Крылова: рыскания  $\psi$ , тангажа  $\vartheta$  и крена  $\gamma$ .



**Рисунок 2** – Взаимное положение связанной и географической системы координат

**Figure 2** – The relative position of the associated and geographical coordinate systems

Матрица направляющих косинусов перехода от географической системы координат к связанной имеет вид [11]:

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & \sin \vartheta & -\cos \vartheta \sin \psi \\ -\cos \gamma \cos \psi \sin \vartheta + \sin \gamma \sin \psi & \cos \gamma \cos \vartheta & \cos \gamma \sin \psi \sin \vartheta + \sin \gamma \cos \psi \\ \sin \gamma \cos \psi \sin \vartheta + \cos \gamma \sin \psi & -\sin \gamma \cos \vartheta & -\sin \gamma \sin \psi \sin \vartheta + \cos \gamma \cos \psi \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Задача ориентации подвижного объекта считается решенной, если будет известна матрица направляющих косинусов (1). Нахождение ортогональной матрицы  $\mathbf{A}$  методом *TRIAD* предполагает наличие двух опорных векторов, заданных проекциями в двух системах координат. Обозначим  $\bar{\mathbf{a}}_g = \|\bar{a}_{Xg} \ \bar{a}_{Yg} \ \bar{a}_{Zg}\|^T$  и  $\bar{\mathbf{b}}_g = \|\bar{b}_{Xg} \ \bar{b}_{Yg} \ \bar{b}_{Zg}\|^T$  – два нормированных вектора ( $|\bar{\mathbf{a}}_g| = 1$ ,  $|\bar{\mathbf{b}}_g| = 1$ ), определённые своими проекциями в географической системе координат. Здесь и далее черта над символом обозначает операцию нормирования. Пусть  $\bar{\mathbf{a}} = \|\bar{a}_x \ \bar{a}_y \ \bar{a}_z\|^T$  и  $\bar{\mathbf{b}}_g = \|\bar{b}_x \ \bar{b}_y \ \bar{b}_z\|^T$  – эти же самые нормированные векторы, но определённые проекциями в связанной с подвижным объектом системе координат. Сформируем из рассмотренных векторов ортогональные тройки единичных векторов координатных осей:

$$\bar{\mathbf{a}}_g, \mathbf{e}_g = \frac{\bar{\mathbf{a}}_g \times \bar{\mathbf{b}}_g}{|\bar{\mathbf{a}}_g \times \bar{\mathbf{b}}_g|}, \mathbf{r}_g = \bar{\mathbf{a}}_g \times \mathbf{e}_g. \quad (2)$$

$$\bar{\mathbf{a}}, \mathbf{e} = \frac{\bar{\mathbf{a}} \times \bar{\mathbf{b}}}{|\bar{\mathbf{a}} \times \bar{\mathbf{b}}|}, \mathbf{r} = \bar{\mathbf{a}} \times \mathbf{e}. \quad (3)$$

Матрица направляющих косинусов перехода от системы координат  $OX_gY_gZ_g$  к системе  $OXYZ$  на основании (2), (3) определяется следующим образом [4]:

$$\mathbf{A}^{Triad} = \begin{pmatrix} \bar{a}_x & e_x & r_x \\ \bar{a}_y & e_y & r_y \\ \bar{a}_z & e_z & r_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{a}_{Xg} & e_{Xg} & r_{Xg} \\ \bar{a}_{Yg} & e_{Yg} & r_{Yg} \\ \bar{a}_{Zg} & e_{Zg} & r_{Zg} \end{pmatrix}^T. \quad (4)$$

Приведём численный пример расчёта матрицы направляющих косинусов по наблюдениям за векторами магнитного поля Земли и ускорения силы тяжести. Пусть объект находится в точке с координатами:

широта  $54^\circ$ , долгота  $34^\circ$ , высота 100 м. Модуль вектора напряжённости в данной точке  $\mathbf{H} = 5,254 \cdot 10^{-5}$  Тл, а его компоненты имеют следующие значения:  $H_{X_g} = 17168$  нТл,  $H_{Y_g} = -49544$  нТл,  $H_{Z_g} = 3373$  нТл.

Рассчитаем компоненты нормированного вектора напряжённости:

$$\bar{\mathbf{H}}_g = \|\|0,327 \quad -0,943 \quad 0,064\|\|^T.$$

Нормированный вектор ускорения силы тяжести в географической системе координат определяется известными компонентами:

$$\bar{\mathbf{g}}_g = \|\|0 \quad 1 \quad 0\|\|^T.$$

Пусть объект повернулся последовательно вокруг точки  $O$  на углы рыскания  $\psi = \pi/6$  рад, тангажа  $\vartheta = \pi/4$  рад и крена  $\gamma = \pi/3$  рад. Матрица направляющих косинусов, рассчитанная по соотношению (1) для данных углов имеет вид:

$$\mathbf{A} = \|\| \begin{matrix} 0,61237 & 0,70711 & -0,35355 \\ 0,12683 & 0,35355 & 0,92678 \\ 0,78033 & -0,61237 & 0,12683 \end{matrix} \|\|.$$

Получим эту же самую матрицу направляющих косинусов, но методом TRIAD. Идеальные нормированные измерения магнитометров и акселерометров имеют следующие значения:

$$\bar{\mathbf{H}} = \|\|-0,554 \quad 0,01 \quad 0,832\|\|^T,$$

$$\bar{\mathbf{g}} = \|\|0,707 \quad 0,354 \quad -0,612\|\|^T.$$

После расчёта ортогональных троек единичных векторов на основании соотношения (4), имеем:

$$\mathbf{A}^{Triad} = \|\| \begin{matrix} 0,70711 & 0,68301 & -0,18301 \\ 0,35355 & -0,56565 & -0,74501 \\ -0,61237 & 0,4621 & -0,64146 \end{matrix} \|\| \|\| \begin{matrix} 0 & 0,70711 & -0,70711 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0,70711 & -0,70711 \end{matrix} \|\|^T.$$

Непосредственной проверкой можно установить, что:

$$\mathbf{A}^{Triad} - \mathbf{A} = \mathbf{O}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{O}$  – нулевая матрица.

По матрице  $\mathbf{A}^{Triad}$  могут быть получены углы рыскания, тангажа и крена [11], которые будут однозначно соответствовать приведённым выше значениям.

В реальных условиях матрица  $\mathbf{A}^{Triad}$  будет отличаться от истинной матрицы  $\mathbf{A}$  даже при идеальных измерениях магнитометров и акселерометров, что может быть вызвано

возмущениями объекта при движении с ускорением. В этом случае вектор измерений акселерометров  $\bar{\mathbf{p}}$  помимо составляющих ускорения силы тяжести будет содержать проекции вектора ускорения объекта, что в конечном счёте приводит к тому, что вектор  $\bar{\mathbf{p}}$  не соответствует вектору ускорения силы тяжести  $\bar{\mathbf{g}}_g = \|\|0 \quad 1 \quad 0\|\|^T$ . Например, при движении центра масс объекта на Север с ускорением  $0,2g$ , погрешность по углу тангажа составит  $11,3^\circ$ , которая влечёт за собой погрешность по углу рыскания (курса) значением  $12,1^\circ$ .

Помимо способа (4), матрица  $\mathbf{A}$  может быть оценена триадой гироскопов на основе измерений проекций вектора угловой скорости объекта и численном интегрировании уравнения Пуассона [4]:

$$\mathbf{A}^{Gyro} = -[\boldsymbol{\omega} \times] \mathbf{A}^{Gyro}, \quad (6)$$

$$\text{где } [\boldsymbol{\omega} \times] = \|\| \begin{matrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{matrix} \|\| - \text{косоcимметрическая}$$

матрица, составленная из проекций вектора угловой скорости.

Пренебрегая вращением географической системы координат при облёте поверхности Земли, проекции вектора  $\boldsymbol{\omega}$  в связанной системы координат определяются соотношениями:

$$\omega_x = \dot{\psi} \sin \vartheta + \dot{\gamma},$$

$$\omega_y = \dot{\psi} \cos \vartheta \cos \gamma + \dot{\vartheta} \sin \gamma, \quad (7)$$

$$\omega_z = -\dot{\psi} \cos \vartheta \sin \gamma + \dot{\vartheta} \cos \gamma.$$

Следует обратить внимание, что матрица  $\mathbf{A}^{Gyro}$ , полученная на основании уравнения (6), будет соответствовать матрице  $\mathbf{A}$  лишь непродолжительное время. Это связано с накоплением погрешностей при интегрировании зашумлённых сигналов гироскопов и отсутствия их избирательности к истинной вертикали  $OY_g$  и направлению на Север  $OX_g$ .

## Модифицированный метод TRIAD

Пусть  $\bar{\mathbf{g}} = \mathbf{g}/|g|$  и  $\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{H}/|H|$  – нормированные векторы ускорения силы тяжести и напряжённости магнитного поля Земли, заданные проекциями в связанной с объектом системе координат. Вектор ускорения силы тяжести в связанной системе координат представим с учётом введённой выше матрицы направляющих косинусов:

$$\bar{\mathbf{g}} = \mathbf{A}\bar{\mathbf{g}}_g.$$

Дифференцируя обе части данного равенства по времени, имеем:

$$\dot{\bar{\mathbf{g}}} = \mathbf{A}\dot{\bar{\mathbf{g}}}_g + \dot{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{g}}_g.$$

Так как  $\dot{\bar{\mathbf{g}}}_g = 0$ , а производная матрицы  $\dot{\mathbf{A}}$  может быть представлена уравнением Пуассона (6), то имеем:

$$\dot{\bar{\mathbf{g}}} = -[\boldsymbol{\omega} \times] \bar{\mathbf{g}}. \quad (8)$$

Аналогично можно записать уравнение для вектора напряжённости:

$$\dot{\bar{\mathbf{H}}} = -[\boldsymbol{\omega} \times] \bar{\mathbf{H}}. \quad (9)$$

Таким образом, если измерять проекции вектора угловой скорости  $\boldsymbol{\omega}$  с помощью гироскопов и знать начальные значения компонент векторов  $\bar{\mathbf{g}}$  и  $\bar{\mathbf{H}}$  в связанной системе координат, то численно решая уравнения (8) и (9), можно получить оценки векторов ускорения силы тяжести и магнитного поля Земли по измерениям гироскопов.

Разрешая уравнения (8) и (9) относительно первых разностей, находим соотношения для дискретного времени

$$\bar{\mathbf{g}}_{k+1}^{Gyro} = (\mathbf{E} - [\boldsymbol{\omega}_{k+1} \times] T_0) \bar{\mathbf{g}}_k^{Gyro}; \quad (10)$$

$$\bar{\mathbf{H}}_{k+1}^{Gyro} = (\mathbf{E} - [\boldsymbol{\omega}_{k+1} \times] T_0) \bar{\mathbf{H}}_k^{Gyro}, \quad (11)$$

где  $\bar{\mathbf{g}}_{k+1}^{Gyro}$ ,  $\bar{\mathbf{H}}_{k+1}^{Gyro}$  – оценки векторов силы тяжести и магнитного поля Земли по измерениям триады гироскопов;  $k = 0, 1, 2, \dots$  – дискретное время;  $T_0$  – период дискретизации;  $[\boldsymbol{\omega}_{k+1} \times]$  – кососимметрическая матрица, составленная из проекций вектора угловой скорости на шаге  $k+1$ ;  $\mathbf{E}$  – единичная матрица размера  $3 \times 3$ .

Для придания векторам  $\bar{\mathbf{g}}_{k+1}^{Gyro}$  и  $\bar{\mathbf{H}}_{k+1}^{Gyro}$  свойства избирательности их необходимо комплексировать с фактическими нормированными показаниями акселерометров и магнитометров:

$$\bar{\mathbf{g}}_{k+1}^c = \alpha_1 (\mathbf{E} - [\boldsymbol{\omega}_{k+1} \times] T_0) \bar{\mathbf{g}}_k^c + (1 - \alpha_1) \bar{\mathbf{p}}_{k+1}; \quad (12)$$

$$\bar{\mathbf{H}}_{k+1}^c = \alpha_2 (\mathbf{E} - [\boldsymbol{\omega}_{k+1} \times] T_0) \bar{\mathbf{H}}_k^c + (1 - \alpha_2) \bar{\mathbf{H}}_{k+1}, \quad (13)$$

где  $\bar{\mathbf{g}}_{k+1}^c$ ,  $\bar{\mathbf{H}}_{k+1}^c$  – комплексированные векторы ускорения силы тяжести и магнитного поля Земли;  $\alpha_1 = [0, 1]$ ,  $\alpha_2 = [0, 1]$  – коэффициенты, определяющие вес соответствующих измерений;  $\bar{\mathbf{p}}_{k+1}$ ,  $\bar{\mathbf{H}}_{k+1}$  – нормированные векторы измерений акселерометрических и магнитометрических датчиков.

Далее по векторам  $\bar{\mathbf{g}}_{k+1}^c$  и  $\bar{\mathbf{H}}_{k+1}^c$  определяется матрица направляющих косинусов методом TRIAD:

$$\mathbf{A}_{k+1}^{Triad} = \begin{pmatrix} \bar{g}_{X_{k+1}}^c & e_{X_{k+1}} & r_{X_{k+1}} \\ \bar{g}_{Y_{k+1}}^c & e_{Y_{k+1}} & r_{Y_{k+1}} \\ \bar{g}_{Z_{k+1}}^c & e_{Z_{k+1}} & r_{Z_{k+1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & e_{X_g} & r_{X_g} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & e_{Z_g} & r_{Z_g} \end{pmatrix}^T, \quad (14)$$

$$\text{где } \mathbf{e}_{k+1} = \frac{\bar{\mathbf{g}}_{k+1}^c \times \bar{\mathbf{H}}_{k+1}^c}{|\bar{\mathbf{g}}_{k+1}^c \times \bar{\mathbf{H}}_{k+1}^c|}, \quad \mathbf{r}_{k+1} = \bar{\mathbf{g}}_{k+1}^c \times \mathbf{e}_{k+1},$$

$$\mathbf{e}_g = \frac{\mathbf{g}_g \times \bar{\mathbf{H}}_g}{|\mathbf{g}_g \times \bar{\mathbf{H}}_g|}, \quad \mathbf{r}_g = \bar{\mathbf{g}}_g \times \mathbf{e}_g.$$

Второй сомножитель в матричном произведении (14) представляет собой матрицу с постоянными элементами, которые определяются значениями компонент вектора напряжённости магнитного поля в данной точке местоположения объекта.

Углы ориентации определяются из матрицы (14) следующим образом:

$$\psi_{k+1} = \arctg 2(-A_{1,3}^{Triad}, A_{1,1}^{Triad}); \quad (15)$$

$$\vartheta_{k+1} = \arctg \left( A_{1,2}^{Triad} / \sqrt{(A_{2,2}^{Triad})^2 + (A_{3,2}^{Triad})^2} \right); \quad (16)$$

$$\gamma_{k+1} = \arctg 2(-A_{3,2}^{Triad}, A_{2,2}^{Triad}). \quad (17)$$

Соотношения (12)–(17) представляют собой алгоритм ориентации подвижного объекта на основе модифицированного метода TRIAD.

## Результаты моделирования

На рисунке 3 приведены результаты моделирования системы ориентации по модифицированному методу TRIAD в сравнении с классическим методом при нулевых параметрах ориентации с учётом воздействия ускорения объекта значением  $0,2g$  в момент времени  $t = 3$  с. Моделирование проводилось для различных значений весового коэффициента  $\alpha_1$ .

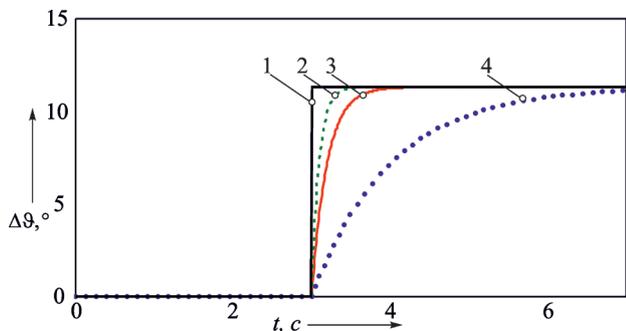
Погрешности угла рыскания, обусловленные также ускорениями объекта, приведены на рисунке 4.

Реакция системы ориентации на ускоренное движение объекта соответствует переходной характеристике апериодического звена первого порядка с постоянной времени:

$$T_1 = \frac{T_0 \alpha_1}{1 - \alpha_1}.$$

Для коэффициента  $\alpha_1 = 0,99$  и периода дискретизации  $T_0 = 0,01$  с постоянная времени составляет  $0,99$  с. Известно, что переходный

процесс аperiodического звена первого порядка заканчивается примерно за время  $t_{\text{п}} = 3T_1$ , следовательно, для данного коэффициента  $t_{\text{п}} \approx 3$  с. При коэффициенте  $\alpha_1 = 0,999$  вес гироскопических измерений будет ещё более значительным и время переходного процесса составит  $t_{\text{п}} \approx 30$  с.



**Рисунок 3** – Погрешность угла тангажа, вызванная ускорением объекта: 1 – классический метод TRIAD; 2, 3, 4 – модифицированный метод TRIAD при  $\alpha_1 = 0,9$ ;  $\alpha_1 = 0,95$ ;  $\alpha_1 = 0,99$  соответственно

**Figure 3** – Pitch angle error caused by object acceleration: 1 – classical TRIAD method; 2, 3, 4 – modified TRIAD method at  $\alpha_1 = 0,9$ ;  $\alpha_1 = 0,95$ ;  $\alpha_1 = 0,99$  respectively

При длительности воздействия ускорения, имеющей значение менее постоянной времени  $T_1$ , система ориентации не успевает значительно накопить погрешность ориентации, что делает данный метод более эффективным, по

сравнению с классическим методом TRIAD.

Степень приближения весовых коэффициентов  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2$ ) к единице ограничивается уровнем инструментальных погрешностей гироскопов. При значительном увеличении веса измерений гироскопов, система ориентации теряет свойство избирательности к плоскости горизонта и к направлению на магнитный Север и начинает накапливать погрешности за счёт их инструментальных погрешностей.

Случайные инструментальные погрешности датчиков первичной информации могут оказывать значительное влияние на точность функционирования системы ориентации, которые могут возникать из-за множества факторов, включая внешние помехи, внутренние шумы и изменения в рабочих условиях [11, 12].

В таблице приведён вклад случайных погрешностей датчиков первичной информации, описанных моделью белого шума, на точность решения задачи ориентации на неподвижном основании при нулевых значениях углов рыскания, тангажа и крена. Среднее квадратическое отклонение (СКО) шума акселерометров и магнитометров принималось равной 0,01 доли от модулей векторов ускорения силы тяжести и напряжённости соответственно. СКО шума гироскопов задавалось 0,1 °/с, что соответствует уровню погрешностей микромеханических гироскопов.

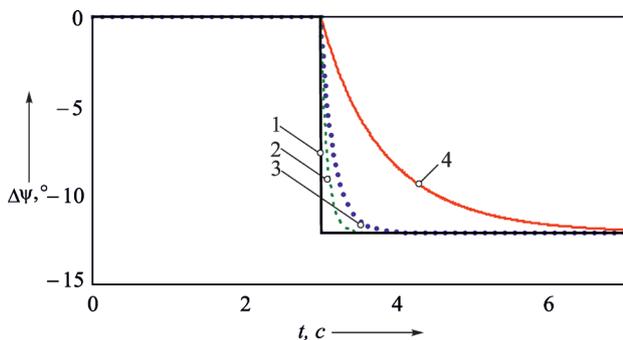
Таблица /Table

### Влияние случайных погрешностей датчиков на точность решения задачи ориентации

#### Influence of random sensors' errors on the accuracy of the orientation problem's solving

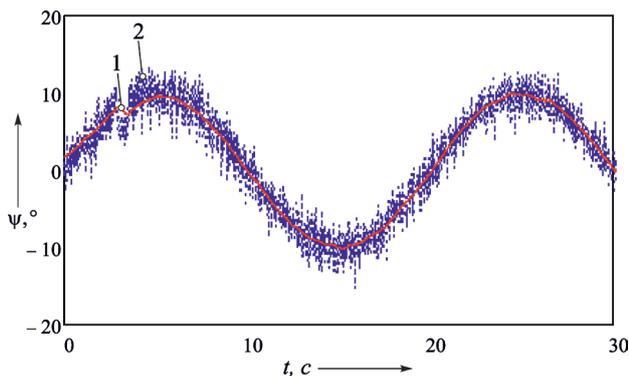
Вид погрешности Type of error	Весовые коэффициенты Weighting factors	$\Delta\psi, \text{ }^\circ(\sigma)$	$\Delta\theta, \text{ }^\circ(\sigma)$	$\Delta\gamma, \text{ }^\circ(\sigma)$
Шум акселерометров Accelerometer noise $\sigma = 0.01g$	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.9$	0.37	0.13	0.13
	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.99$	0.12	0.042	0.042
Шум магнитометров Magnetometer noise $\sigma = 0.01 \mathbf{H} $	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.9$	0.395	0.0	0.0
	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.99$	0.13	0.0	0.0
Шум гироскопов Gyro noise $\sigma = 0.1 \text{ }^\circ/\text{с}$	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.9$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$
	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.99$	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$7.1 \cdot 10^{-3}$	$7.7 \cdot 10^{-3}$
Результирующая погрешность Resulting error	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.9$	0.54	0.14	0.14
	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.99$	0.2	0.1	0.1
	Классический метод TRIAD / Classic TRIAD method	1.6	0.6	0.6

На рисунках 5–7 приведены результаты моделирования системы ориентации при синусоидальных законах изменения углов рыскания, тангажа и крена с амплитудами  $10^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $15^\circ$  и частотами 0,05 Гц, 0,03 Гц, 0,04 Гц соответственно. Угловые скорости объекта моделировались по соотношениям (7). СКО случайных погрешностей датчиков первичной информации задавались из таблицы, весовые коэффициенты комплексирования принимались  $\alpha_i = 0.99$ . В интервале времени 3–3,5 с моделировалось движение центра масс объекта с ускорением  $0,2g$  вдоль оси  $OX_g$ .



**Рисунок 4** – Погрешность угла рыскания, вызванная ускорением объекта: 1 – классический метод TRIAD; 2, 3, 4 – модифицированный алгоритм TRIAD при  $\alpha_1 = 0.9$ ;  $\alpha_1 = 0.95$ ;  $\alpha_1 = 0.99$  соответственно

**Figure 4** – Yaw angle error caused by object acceleration: 1 – classical TRIAD method; 2, 3, 4 – modified TRIAD algorithm at  $\alpha_1 = 0.9$ ;  $\alpha_1 = 0.95$ ;  $\alpha_1 = 0.99$  respectively



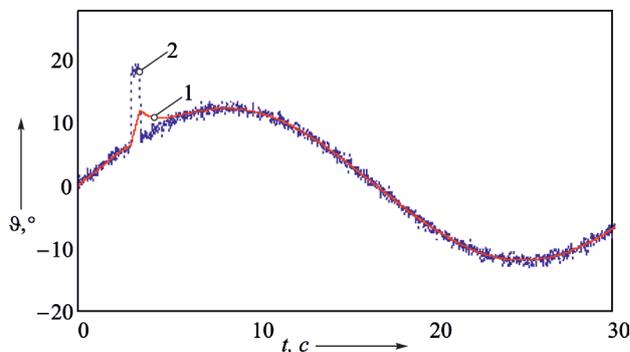
**Рисунок 5** – Графики зависимостей углов рыскания от времени: 1 – модифицированный метод TRIAD; 2 – классический метод TRIAD

**Figure 5** – Graphs of time dependences of yaw angles: 1 – modified TRIAD method; 2 – classical TRIAD method

Из результатов моделирования можно сделать вывод о том, что с увеличением

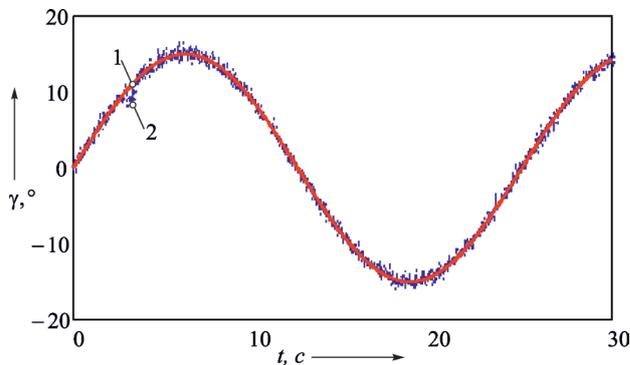
с веса измерений гироскопов (коэффициенты  $\alpha_i$  приближаются к 1):

- уменьшается СКО случайных погрешностей углов системы ориентации;
- увеличивается время переходного процесса дрейфа углов к ложным показаниям, вызванных ускоренным движением объекта.



**Рисунок 6** – Графики зависимостей углов тангажа от времени: 1 – модифицированный метод TRIAD; 2 – классический метод TRIAD

**Figure 6** – Graphs of time dependences of pitch angles: 1 – modified TRIAD method; 2 – classical TRIAD method



**Рисунок 7** – Графики зависимостей углов крена от времени: 1 – модифицированный метод TRIAD; 2 – классический метод TRIAD

**Figure 7** – Graphs of time dependences of roll angles: 1 – modified TRIAD method; 2 – classical TRIAD method

Кроме того, СКО погрешностей модифицированного метода TRIAD при  $\alpha_i = 0.99$  в 6 раз меньше по углам тангажа, крена и в 8 раз меньше по углу рыскания (курса) в сравнении с классическим методом TRIAD. Это даёт основание считать, что предложенный метод более предпочтительным для реализации систем ориентации подвижных объектов.

## Заключение

Предложен модифицированный метод TRIAD комплексирования сигналов трёх триад датчиков: магнитометров, акселерометров и гироскопов. Метод может быть полезен для реализации бесплатформенных систем ориентации подвижных объектов различного базирования, так как в 6–8 раз точнее по сравнению с классическим методом TRIAD. Идея метода основана на предварительном комплексировании сочетаний триад датчиков: акселерометров с гироскопами и магнитометров с гироскопами с последующим вычислением матрицы направляющих косинусов. Степень ослабления случайных погрешностей датчиков и возмущений от ускорений объекта может настраиваться коэффициентами  $\alpha_i$ . По матрице направляющих косинусов могут быть получены углы Эйлера–Крылова.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Тульской области в сфере науки и техники по договору ДС/112/ЛИДПИ/23/ТО.

## Acknowledgments

The work was carried out with the support of a grant from the Government of the Tula Region in the field of science and technology under contract DS/112/LIDPI/23/TO.

## Список использованных источников

1. Туктарёв Н.А. Автономное инерциально-магнитометрическое устройство определения углов ориентации летательного аппарата / Н.А. Туктарёв [и др.] // Труды МАИ. 2016. – № 88.
2. Fei Liu, Jie Li, Haifu Wang, Chang Liu. An improved quaternion Gauss-Newton algorithm for attitude determination using magnetometer and accelerometer. Chinese Journal of Aeronautics. – 2014. – Vol. 27. – № 4. DOI: 10.1016/j.cja.2014.03.005
3. Markley L., Crassidis J. Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control. New York, Springer. 2014. 486 p.
4. Hashim H.A. Attitude Determination and Estimation using Vector Observations: Review, Challenges and Comparative Results, arXiv preprint, 2020. 51 p.

5. Belkhiat D.E.C., Fourati H. Multisensor Attitude Estimation: Fundamental Concepts and Applications. Boca Raton, CRC Press, 2016. 607 p.

6. Иванов Д.С. Результаты летных испытаний системы ориентации микроспутника Чибис-М. / Д.С. Иванов [и др.] // Космические исследования. Т. 52. – № 3. – 2014. – С. 218–228.

DOI: 10.7868/S0023420614020046

7. Вялков А.В. Определение углов ориентации по наблюдениям за векторами в задаче исследования штопора модели самолета // Гироскопия и навигация. 2020. – Т. 28. – № 3 (110). – С. 43–59.

8. Голован А.А. Математические основы навигационных систем: Часть II: Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. – 2-е изд., испр. и доп. / А.А. Голован, Н.А. Парусников // М.: МАКС Пресс. – 2012. – 172 с.

9. Garcia de Marina, Hector & Pereda, Fernando & Giron-Sierra, Jose & Espinosa, Felipe. UAV attitude estimation using unscented Kalman filter and TRIAD. Industrial Electronics, IEEE Transactions, Nov. 2012. Vol. 59(11). – Pp. 4465–4474.

DOI: 10.1109/TIE.2011.2163913

10. Sawicki A., Slanina Z., Linkel A. Compensation of hard- and soft-iron distortions is magnetometer measurement data. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, August 2017. DOI: 10.1117/12.2280794

11. Августов Л.И. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве / Августов Л.И. [и др.]; под редакцией доктора технических наук, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, профессора Джанджгавы Г.И. – Изд. 2-е, перераб. – Москва: Грани успеха. – 2022. – 547 с.

12. Borodacz K., Szczepanski C. Impact of Motion-Dependent Errors on the Accuracy of an Unaided Strapdown Inertial Navigation System. Sensors. 2023. – Vol. 23. – № 3. DOI: 10.3390/s23073528

## References

1. Tuktarev NA, Akhmedova SK, Grishin DV, Bursurin VI. Autonomous inertial-magnetometric device for determining the orientation angles of an aircraft. Proceedings of MAI. 2016;(88). (In Russ.).
2. Fei Liu, Jie Li, Haifu Wang, Chang Liu. An improved quaternion Gauss-Newton algorithm for attitude determination using magnetometer and accelerometer. Chinese Journal of Aeronautics. 2014;27(4). DOI: 10.1016/j.cja.2014.03.005
3. Markley L, Crassidis J. Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control. New York, Springer. 2014. 486 p.

4. Hashim HA. Attitude Determination and Estimation using Vector Observations: Review, Challenges and Comparative Results, arXiv preprint, 2020. 51 p.

5. Belkhiat DEC, Fourati H. Multisensor Attitude Estimation: Fundamental Concepts and Applications. Boca Raton, CRC Press, 2016. 607 p.

6. Ivanov DS, Ivlev NA, Karpenko SO, Ovchinnikov MYu, Roldugin DS. Results of flight tests of the orientation system of the Chibis-M microsatellite. Space Research. 2014;52(3):218-228.

**DOI:** 10.7868/S0023420614020046

7. Vyalkov AV. Determination of orientation angles from observations of vectors in the problem of studying the spin of an aircraft model. Gyroscopy and Navigation. 2020;28(3)(110):43-59. (In Russ.).

8. Golovan AA, Parusnikov NA. Mathematical Foundations of Navigation Systems: Part II: Applications of Optimal Estimation Methods to Navigation Problems. - 2<sup>nd</sup> ed., corrected and supplemented. M.: MAX Press. 2012. 172 p.

9. Garcia de Marina, Hector & Pereda, Fernando & Giron-Sierra, Jose & Espinosa, Felipe. UAV attitude estimation using unscented Kalman filter and TRIAD. Industrial Electronics, IEEE Transactions, Nov. 2012;59(11):4465-4474. **DOI:** 10.1109/TIE.2011.2163913

10. Sawicki A, Slanina Z, Linkel A. Compensation of hard- and soft-iron distortions is magnetometer measurement data. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, August 2017.

**DOI:** 10.1117/12.2280794

11. Avgustov LI [et al.]. Navigation of aircraft in near-Earth space; edited by Doctor of Technical Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor Dzhandzhgava G.I. - 2<sup>nd</sup> ed., revised. Moscow: Grani uspekha, 2022. 547 p.

12. Borodacz K, Szczepanski C. Impact of Motion-Dependent Errors on the Accuracy of an Unaided Strapdown Inertial Navigation System. Sensors. 2023;23(3).

**DOI:** 10.3390/s23073528

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-205-212

# Experimental Verification of Laser Radar Cross Section Model for Complex Targets with Gaussian Beam Irradiation

A.I. Kalugin, D.N. Kochurova, E.A. Antonov, M.Yu. Alies

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Tatyana Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 19.07.2024

Accepted for publication 02.09.2024

## Abstract

The reflection of a Gaussian laser beam from a flat Lambert disk is considered theoretically. It was found that the results of experimental measurements of the reflected beam power as a function of the disk radius at various distances from the photodetector to the target are in good agreement with the theoretical model. It was shown that when the radius of the laser beam is greater than the dimensions of the probed complex target this target can be replaced by an equivalent Lambert disk with the same laser radar cross section.

**Keywords:** laser scanning, laser radar cross section, lidar, gaussian beam

---

### Адрес для переписки:

Калугин А.И.  
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия  
e-mail: ackad1976@yandex.ru

### Address for correspondence:

Kalugin A.I.  
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian  
Academy of Sciences,  
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia  
e-mail: ackad1976@yandex.ru

---

### Для цитирования:

A.I. Kalugin, D.N. Kochurova, E.A. Antonov, M.Yu. Alies.  
Experimental Verification of Laser Radar Cross Section Model  
for Complex Targets with Gaussian Beam Irradiation.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 205–212.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-205-212

### For citation:

Kalugin AI, Kochurova DN, Antonov EA, Alies MYu.  
Experimental Verification of Laser Radar Cross Section Model  
for Complex Targets with Gaussian Beam Irradiation.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):205–212.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-205-212

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-205-212

# Экспериментальная проверка модели эффективной площади отражения сложных объектов в гауссовом лазерном пучке

А.И. Калугин, Д.Н. Кочурова, Е.А. Антонов, М.Ю. Альес

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 19.07.2024

Принята к печати 02.09.2024

Теоретически рассмотрено отражение лазерного гауссова пучка от плоского круглого ламбертова диска. Установлено, что результаты экспериментальных измерений мощности отражённого пучка в зависимости от радиуса диска при различных дистанциях от фотоприёмной системы до объекта хорошо согласуются с теоретической моделью. Показано, что при радиусе лазерного пучка больше размеров зондируемого объекта сложной формы, его можно заменить эквивалентным ламбертовым диском с такой же эффективной площадью отражения.

**Ключевые слова:** лазерное сканирование, эффективная площадь отражения, лидар, гауссов пучок

---

**Адрес для переписки:**

Калугин А.И.  
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия  
e-mail: ackad1976@yandex.ru

**Address for correspondence:**

Kalugin A.I.  
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian  
Academy of Sciences,  
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia  
e-mail: ackad1976@yandex.ru

---

**Для цитирования:**

A.I. Kalugin, D.N. Kochurova, E.A. Antonov, M.Yu. Alies.  
Experimental Verification of Laser Radar Cross Section Model  
for Complex Targets with Gaussian Beam Irradiation.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 205–212.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-205-212

**For citation:**

Kalugin AI, Kochurova DN, Antonov EA, Alies MYu.  
Experimental Verification of Laser Radar Cross Section Model  
for Complex Targets with Gaussian Beam Irradiation.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):205–212.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-205-212

## Introduction

Application of LiDARs for detecting, recognizing, and tracking objects has recently expanded significantly. The most important characteristic for estimation of the target detection range is its laser radar cross section (LRCS) [1–4]. It depends on the geometric shape, reflective properties, and orientation of the object. Traditionally, LRCS is measured by comparison with the standard one [5, 6]. At the same time, numerical modeling methods for LRCS estimation have been significantly developed [6–10]. The theoretical calculations of the LRCS are known for some objects with simple geometric shapes [2, 7]. This is especially important because an object can be represented as a set of elements that are in most cases simple in shape and thus one obtains a quick LRCS estimation of a complex object. However, numerical modeling requires knowledge of many object parameters, such as the bidirectional reflection distribution function [11, 12], its exact geometric shape, and from what materials the object is made of. In theoretical analysis many significant simplifications have to be applied. So an object is usually considered as to be illuminated with a laser beam having a uniform power distribution, whereas in reality the beam has often a Gaussian distribution in space. In addition – simulation results are often difficult to verify experimentally.

In this paper, we for the first time (as far as we know) theoretically consider the reflection of a Gaussian beam from a circular disk, which reflects according to Lambert's law. Experimental measurements of a reflected laser beam power are given as a function of the disks' radii, the distance to them, and for a model of an object with complex geometric shape. A method for estimating the reflected radiation power simplified in comparison with the radar equation based on the construction of an equivalent Lambert disk with an LRCS equal to the target LRCS one is proposed.

## Theoretical analysis

Let us assume that the radiation source generates a laser pulse with a given temporal and spatial distribution of the radiation power density  $I(\mathbf{r}, t)$ . Laser radiation emitted by a small section of the source  $d\sigma_s$  illuminates a small area of the object  $dS$  with the normal vector  $\mathbf{n}$  located in the direction  $\mathbf{r}_1$  from  $d\sigma_s$  after passing through the propagation medium with the transmission coefficient  $T_1$  (Figure 1).

After interacting with the object the radiation passes through the propagation medium with the transmission coefficient  $T_2$  in the direction  $\mathbf{r}_2$  and enters the receiver small section  $d\sigma_d$  with the registration efficiency  $\eta$ . The fraction of radiation  $\rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$  (bidirectional reflection distribution function) reflected towards the receiver element  $d\sigma_d$  depends on the optical properties of the object surface element  $dS$ , its relative orientation determined by angles between the normal vector and the directions to the sections of the source  $d\sigma_s$  and the receiver  $d\sigma_d$ .

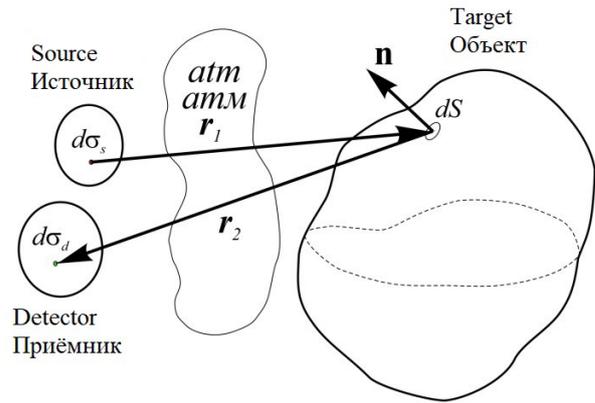


Figure 1 – Scheme of object probing by a laser pulse

The power  $d^3P(t)$  received by the photodetector element at time  $t$  is equal to [4]:

$$d^3P(t) = I'(\mathbf{r}, t) T_1 T_2 \frac{\rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)}{r_1^2 r_2^2} \frac{(-\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{n})}{r_1} \frac{(\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{n})}{r_2} \eta dS d\sigma_s d\sigma_d, \quad (1)$$

where  $t' = t - l(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)/c$ ,  $l(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$  is the optical path length in the forward and backward directions;  $c$  is the speed of light.

Denote the total power falling from the source to the object as  $P_a$ :

$$P_a(t) = \iint_{\sigma_s} \frac{I'}{r_1^2} dS d\sigma_s = 2\pi r^2 I_{av}(t), \quad (2)$$

where the integration is carried out over a part of the object surface  $S$  the radiation reflected from which will arrive at the input of the receiving system at the same time,  $I_{av}$  is the average power density of the laser beam,  $r$  is the distance from source to target. The reflected from the object power will be proportional to LRCS which based on Eq.(1) and with taking into account Eq.(2) is equal to:

$$\sigma(t) = \frac{1}{P_a} \iint_{\sigma_s} \int \int I' \rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \frac{(-\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{n})}{r_1} \frac{(\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{n})}{r_2} \cdot dS \cdot d\sigma_s.$$

If the distance to the probed objects is much greater than the distance between the source and the receiver and also greater than their sizes and the object size then  $r_1 \approx r_2 = r$  and therefore  $T_1 \approx T_2 = T$  can be taken. The following formula is obtained from Eq.(1):

$$P(t) = T^2 \frac{I_{av}(t - 2r/c)}{2\pi r^2} \sigma \left( t - \frac{2r}{c} \right) \sigma_d \eta, \quad (3)$$

where  $\sigma_d$  is the area of the entrance pupil of the receiver objective, and it is assumed that the sensitivity of the photodetector is the same over the entire surface of it. Thus LRCS can be defined as the area of a certain flat surface, which is located perpendicular to the direction of the incident wave and reflects the same power in the direction of the photodetector as the probed object when it's placed at the point of location of the that object. In general, LRCS is a function of time because different parts of the object's surface are illuminated at different times during probing by a laser pulse.

We consider the reflection of laser radiation from a Lambert circular disk with  $\rho(r_1, r_2) = \rho_t = \text{const}$  of radius  $r_t$  located at a distance  $z$  from the receiver and oriented perpendicular to the axis of the laser beam. Let the radiation source forms a Gaussian beam in the plane of the probed disk with the power density in the cross section:

$$I(r') = I_0 \cdot e^{-\frac{r'^2}{w^2}},$$

where  $I_0 = P_0/(\pi w^2)$  is the radiation power density at the center of the beam;  $P_0$  – laser power;  $w$  is the radius of beam where irradiance decreases by a factor of  $1/e$ . The reflected power of the radiation arriving at the input aperture of the receiver objective is:

$$P = \iint_{\sigma_d} \frac{I_0 \cdot e^{-r'^2/w^2}}{2\pi r_{td}^2} \rho_t \eta \cdot dS d\sigma_d,$$

where  $r_{td}$  is the distance from the small disk element  $dS$  to the receiver element  $d\sigma_d$  (Figure 2);  $dS = r' dr' d\varphi'$ , and  $r'$  ranges from 0 to  $r_t$ .

In the approximation  $r_{td}^2 = z^2 + r'^2$  for  $r_{td} \gg r_d$  ( $r_d$  is the radius of the aperture of the receiver objective), it can be assumed that a weakly varying in power amplitude electromagnetic field is created in the plane of the photodetector. If we assume that the sensitivity of the receiving area is uniform ( $\eta = \text{const}$ ), then the integral can be transformed to the equation:

$$P = I_0 \frac{\rho_t \eta \sigma_d}{2\pi} \int_0^{r_t} \frac{e^{-r'^2/w^2}}{z^2 + r'^2} 2\pi r' dr' =$$

$$= \frac{1}{2} I_0 \rho_t \eta \sigma_d \cdot e^{\frac{z^2}{w^2}} \int_{z^2/w^2}^{\frac{z^2}{w^2} + \frac{r_t^2}{w^2}} \frac{e^{-x}}{x} dx.$$

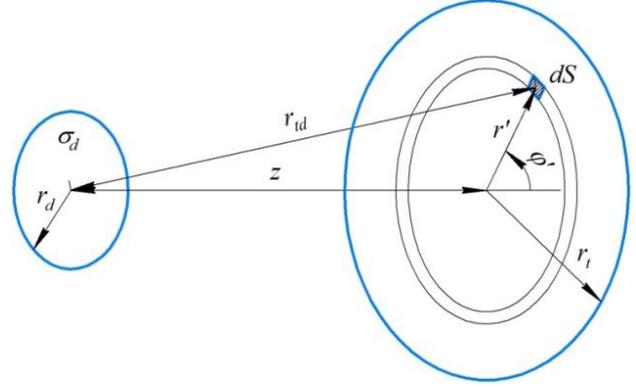


Figure 2 – Scheme for calculating the power of reflected radiation

Taking into account the definition of the integral exponential function of the first kind [13]:

$$\text{Ei}_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt,$$

we obtain:

$$P = \frac{1}{2} I_0 \rho_t \eta \sigma_d \cdot e^{\frac{z^2}{w^2}} \left[ \text{Ei}_1\left(\frac{z^2}{w^2}\right) - \text{Ei}_1\left(\frac{r_t^2 + z^2}{w^2}\right) \right].$$

In most cases, this expression can be simplified by considering that  $z \gg r_t$  and  $z \gg w$ :

$$P = \frac{I_0 \rho_t \eta \sigma_d w^2}{2z^2} \left[ 1 - e^{-\frac{r_t^2}{w^2}} \right]. \quad (4)$$

From this equation the LRCS of the Lambert disk is equal to:

$$\sigma_t = \pi w^2 \rho_t \left[ 1 - e^{-\frac{r_t^2}{w^2}} \right]. \quad (5)$$

This is consistent with the results [1, 8]. In this case the radius of the Gaussian beam changes with distance according to the expression:

$$w^2 = w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z'}{\pi w_0^2} \right)^2 \right], \quad (6)$$

where  $w_0$  is the beam waist radius;  $z' = z + z_0$ ;  $z_0$  is the distance from the Gaussian beam waist to laser lens;  $\lambda$  is the radiation wavelength. Hence the LRCS also depends on the distance  $z$ .

The obtained expressions are valid if the center of the laser Gaussian beam coincides with the center of the probed disk. If the center of the disk is displaced from the beam axis, the expressions become much more complicated. The reflected power in this case can be found using the Eq.(A.2) (Appendix A).

### Experimental results and discussion

From the Eq.(5) it follows that if the beam width is much less than the target size  $w \ll r_t$  then LRCS increases with distance  $z$  according to the quadratic law  $\sigma_t = \rho_t \pi w^2$  where  $w$  is proportional to  $z$  in accordance with Eq.(6). Since irradiance at the center of the beam  $I_0$  decreases in proportion to  $z^{-2}$  in Eq.(4), the power  $P$  recorded by the photodetector will also decrease in proportion to  $z^{-2}$ . However, as the ratio  $r_t/w$  decreases, the increase of LRCS slows down, and it itself rapidly tends to the value  $\rho_t \pi r_t^2$ . As a result, at  $w \geq r_t$  the measured power starts to decrease faster in proportion to  $z^{-4}$ . Therefore, it should seek for scanning by a laser beam with a small radius to detect small objects.

At the same time wide beam scanning has its advantages. Full coverage of the target by the beam allows LRCS to be obtained from the entire object and therefore the measured signal will contain information about the entire object. Measurement

of the time dependence of a reflected power from the target allows it to be used for object recognition [2]. Whereas in the case of a narrow beam only a part of the object is measured and it is difficult to ensure that two successive laser pulses hit the same part of the object. Therefore the time dependence of the LRCS obtained with a narrow laser beam is not suitable for obtaining additional information about an object and determining its type.

To test the theoretical model (4), the power of the Gaussian beam reflected from the objects was measured experimentally. All elements of the experimental setup for measuring the power of the reflected laser beam are located in the non-reflective box to reduce the influence of external factors (Figure 3). The source of laser radiation was a DPSS laser manufactured by "Thorlabs, Inc." CPS532 with a wavelength of 532 nm. To form the required radiation divergence (0.026 rad), an objective with a focal length of -6.25 cm was developed. To measure the LRCS of complex-shaped objects, they were placed on a rotating and moving device that sets their different orientations. After reflection from the object, the radiation is received by a Gentec-EO PH100-Si-HA-OD1-D0 photodetector located at the same distance from the object as the exit pupil of the laser source objective. Data from the photodetector are converted by the Gentec-EO U-LINK (USB) PC interface and output to the PC as radiation power values. In this case, the distance between the source and the receiver of radiation is much less than the distance to the object.

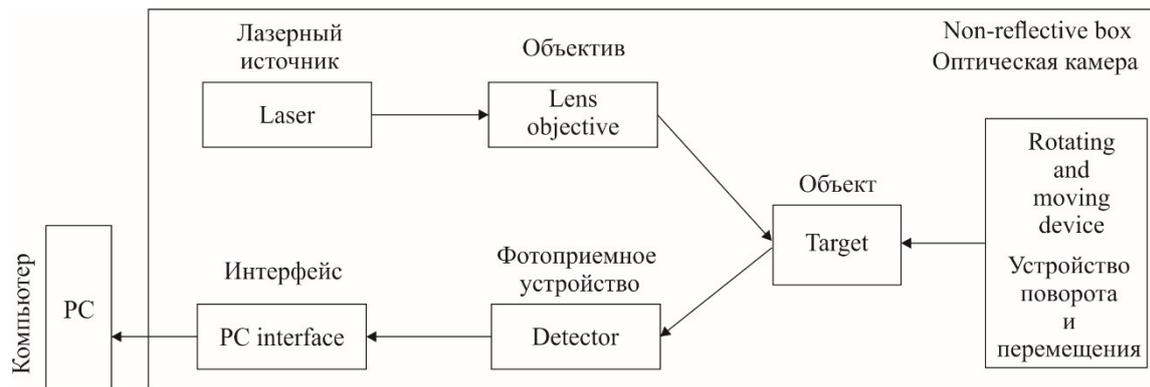


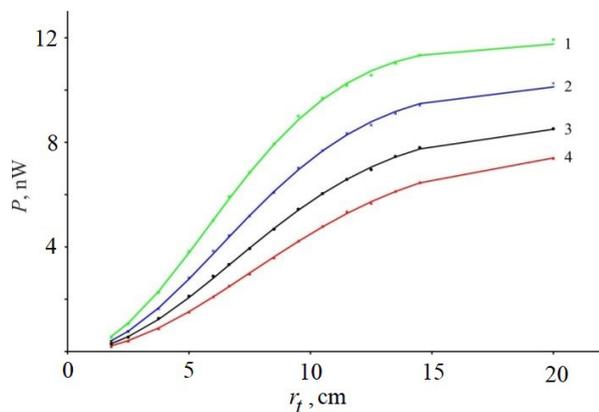
Figure 3 – Scheme of the experimental setup

To determine the parameters of the laser beam formed by the lens, the photodetector was placed on the rotating and moving device. The beam profile was measured at several distances from the laser radiation source. Detailed measurements of the la-

ser beam profile showed that it has some differences from the Gaussian profile. For the laser we used, the maximum deviations do not exceed 10 %, and the average deviation is less than 4 %, which allows us to use the Gaussian beam model. The laser beam

radius was defined as the radius of the circle on which the power density drops by a factor of  $e$ . The change in the laser beam radius depending on the distance is in complete agreement with expression (6) for a waist width of  $w_0 = 6.3 \mu\text{m}$  and its position relative to the laser exit pupil of  $-17.7 \text{ cm}$ .

Paper flat discs were chosen as targets. The radius of the disks  $r_t$  varied in the range of 1.5–20 cm. The choice of paper as a material for discs is due to the fact that it reflects almost according to Lambert's law, and the reflection coefficient is relatively high:  $\rho_t = 0.67$ . The beam radius was 8–11 cm at distances from 300 to 400 cm. The results of measurements of the reflected power at four distances  $z$  from the source to the target are shown in Figure 4. For all four distances, the experimental values are well described by dependencies (4) with  $P_0 = 4.1 \text{ mW}$ ,  $\eta\sigma_d = 0.9 \text{ cm}^2$ .

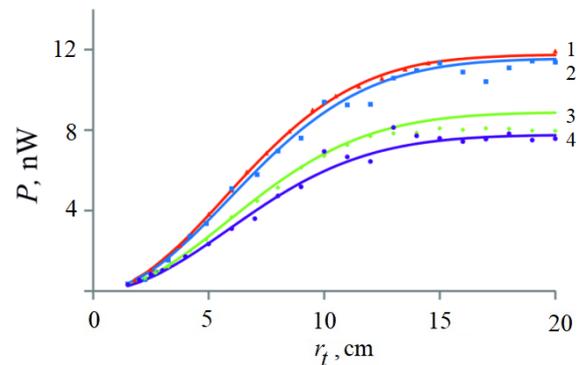


**Figure 4** – Radiation power  $P$  reflected from a target with radius  $r_t$  located at a distance of 315 (1), 340 (2), 370 (3), and 400 cm (4): dots stand for the experimental values, lines stand for the theoretical curves of the Eq.(4)

Measurements of the reflected power from disks made of different materials with different reflection coefficients confirm theoretical results for distances from 250 to 400 cm. The results for the discs placed at a distance 315 cm are shown in Figure 5. The reflection coefficients are 0.64 (plastic), 0.67 (paper), 0.515 (textile), 0.45 (wood).

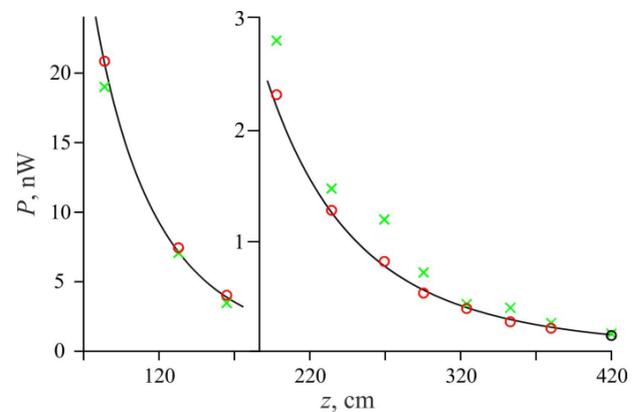
Let's assume that the LRCS of an object with a complex geometric shape is known. Then you can associate it with a flat disk with a diameter approximately equal to the transverse dimensions of the object and can calculate the reflection coefficient from the Eq. (5). The diameter should be chosen based on the size of the object as it is important to keep the  $r_t/w$  ratio approximately the same as for the real

target. Further a simpler Eq. (4) can be used instead of the Eq. (3) which requires knowledge of the dependence of LRCS on the distance to the object.



**Figure 5** – Radiation power  $P$  received by the photodetector, depending on the material of disks: paper (1), plastic (2), textile (3), wood (4), the solid line is stand for the theoretical curve of the Eq.(4)

Measurements were carried out for various objects with complex surface shapes. Figure 6 shows the results of comparison of received power after reflection from a T-34 tank model (scale 1:43) and from an equivalent disk with a radius of 5 cm. The reflection coefficient of the disk was 0.25.



**Figure 6** – Radiation power  $P$  received by the photodetector, depending on the distance  $z$  to the target: crosses stand for the measured reflected power from the T-34 tank model, circles stand for the disk with laser radar cross section equal to the laser radar cross section of the model, the solid line is stand for the theoretical curve of the Eq.(4)

Similar dependencies were obtained for other objects. As expected the largest discrepancies are observed at small distances where the beam width is less than the target dimensions. As the distance to the target increases the beam radius increases and the values agree much better. Thus replacing a complex

object with an equivalent LRCS disk allows to obtain correct estimations of the reflected power at large distances to the target. Measurements of the power of the reflected signal at several distances to the object make possible to estimate the size of the probed object. Good quantitative agreement of the theoretical equation (4) with experimental measurement results allows it to be used for estimate the maximum detection range of a target. The maximum range can be expressed from equations (4)–(6) provided that the power received by the receiver is the minimum registered power  $P_{\min}$ , at which it is still possible to detect an object against the background of noise, and provided that  $z \gg w_0 r_t / \lambda$  i. e. when the LRCS of the object tends to the value  $\rho_t \pi r_t^2$ . Thus, the maximum range is:

$$z_{\max}^4 = \frac{\pi P_0 w_0^2 \eta \sigma_d \rho_t r_t^2}{2 \lambda^2 P_{\min}}$$

In our case, at  $P_{\min} = 0.15$  nW, the maximum detection range of the T-34 tank model was 4.3 m.

## Conclusions

The paper presents a theoretical model of a Gaussian beam power reflected from a Lambert circular reflector. Dependence of the laser radar cross section on the distance between the radiation source and the target is considered. Powers of reflected laser radiation from disks of different radii are measured experimentally. Theoretical calculations are in good agreement with experimental data. Measurements of the reflected from a complex-shaped object radiation power have shown that dependence of the reflected light power on the distance to the object agrees well with the such dependence for disks. The model can be used for calculation the maximum detection range

to an object with a known laser radar cross section as well as for estimation of the power registered by the photodetector.

## Appendix A. Beam center offset correction

Let us consider how the displacement of the center of the disk from the center of the laser spot will affect the power received by the photodetector. Let's choose the center of the disk as the origin. Let the center of the beam be displaced along the  $OX$  axis by a small distance  $r_0 \ll w$ . Then the power density can be written as:

$$I(r') = I_0 e^{-\frac{(r' \cos \varphi - r_0)^2 + (r' \sin \varphi)^2}{w^2}},$$

where  $r'$  and  $\varphi$  – are polar coordinates. It is easy to convert this expression to the form:

$$I(r') = I_0 e^{-\frac{r_0^2}{w^2}} \cdot e^{-\frac{r'^2}{w^2}} \cdot e^{-\frac{2r' r_0 \cos \varphi}{w^2}}$$

Further we will assume that the distance to the disk  $z$  is much greater than the beam radius and the disk radius  $r_t$ . Then the power reflected from the disk and is incident onto the entrance pupil of the receiving optical system, is equal to:

$$P = I_0 \frac{\rho_t \eta \sigma_d}{\pi z^2} e^{-\frac{r_0^2}{w^2}} \int_0^{2\pi r_t} \int_0^{r_t} e^{-\frac{r'^2}{w^2}} e^{-\frac{2r' r_0 \cos \varphi}{w^2}} r' dr' d\varphi$$

To calculate the integral we note that the second exponential component has a small value in the integral and so it can be expanded into a series:

$$e^{-\frac{2r' r_0 \cos \varphi}{w^2}} \approx 1 + \frac{2r' r_0 \cos \varphi}{w^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{2r' r_0 \cos \varphi}{w^2} \right)^2 + \dots$$

Then:

$$P \approx I_0 \frac{\rho_t \eta \sigma_d}{\pi z^2} e^{-\frac{r_0^2}{w^2}} \cdot \left[ \int_0^{2\pi r_t} \int_0^{r_t} e^{-\frac{r'^2}{w^2}} r' dr' d\varphi + \int_0^{2\pi r_t} \int_0^{r_t} e^{-\frac{r'^2}{w^2}} \frac{2r' r_0 \cos \varphi}{w^2} r' dr' d\varphi + \frac{1}{2} \int_0^{2\pi r_t} \int_0^{r_t} e^{-\frac{r'^2}{w^2}} \left( \frac{2r' r_0 \cos \varphi}{w^2} \right)^2 r' dr' d\varphi \right]$$

The first term in the expression is:

$$\int_0^{2\pi r_t} \int_0^{r_t} e^{-\frac{r'^2}{w^2}} r' dr' d\varphi = \pi w^2 \left[ 1 - e^{-\frac{r_t^2}{w^2}} \right]$$

The second term is zero and the third is:

$$\frac{1}{2} \int_0^{2\pi r_t} \int_0^{r_t} e^{-\frac{r'^2}{w^2}} \left( \frac{2r' r_0 \cos \varphi}{w^2} \right)^2 r' dr' d\varphi = \pi r_0^2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{r_t^2}{w^2} \right) \cdot e^{-\frac{r_t^2}{w^2}} \right]$$

After all the simplifications we obtain the final expression for the power received by the photodetector:

$$P = I_0 \frac{\rho_t \eta \sigma_d}{\pi z^2} \cdot e^{-\frac{r_0^2}{w^2}} \cdot \pi w^2 \times \left[ \left( 1 - \frac{r_0^2}{w^2} \right) \left( 1 - e^{-\frac{r_t^2}{w^2}} \right) + \frac{r_0^2 r_t^2}{w^4} \cdot e^{-\frac{r_t^2}{w^2}} \right] \quad (A1)$$

To calculate the relative error we find the ratio of the power difference  $P_1$  according to the Eq.(4) and  $P_2$  according to the Eq.(A.1) to  $P_1$ :

$$\varepsilon = \frac{P_1 - P_2}{P_1} = 1 - \left( 1 - \frac{r_0^2}{w^2} \right) \cdot e^{-\frac{r_0^2}{w^2}} - \frac{r_0^2 r_i^2}{w^4} \cdot \frac{1}{e^{r_i^2/w^2} - 1}. \quad (\text{A2})$$

## References

1. Osche GR, Seeber KN, Lok YF, Young DS. Laser radar cross-section estimation from high-resolution image data. *Applied Optics*. 1992;31(14):2452-2460. **DOI:** 10.1364/AO.31.002452
2. Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections. *Applied Optics*. 2000;39(24):4381-4391. **DOI:** 10.1364/AO.39.004381
3. Stutz S, Schiller M, Eberle B, Henrichsen M. Investigations on the laser radar cross section of optical components. *Proc. SPIE 12738 Technologies for Optical Countermeasures XIX*. 2023;1273809 p.
4. Alies MYu. [et al.] Reflection of Laser Radiation with a Gaussian Intensity Distribution from a Rough Surface *Chemical physics and mesoscopy*. 2022;24(24):454-462. (In Russ.). **DOI:** 10.15350/17270529.2022.4.36
5. Ang YX, Lui H.-S. Scaled-Model Radar Cross-Section Measurement: The Influence of the Scattered Field under Gaussian Beam Illumination – A Theoretical Analysis. *Sensors*. 2023;23:7202 p. **DOI:** 10.3390/s23167202

6. Potapova NI. Technique for calculating the effective scattering area of diffusely reflecting objects of complex shape. *J. Opt. Technol.* 2014;81(9):504-509. **DOI:** 10.1364/JOT.81.000504
7. Cao Y. [et al.] Calculation method for laser radar cross sections of rotationally symmetric targets. *Applied Optics*. 2017;56(19):5520-5525. **DOI:** 10.1364/AO.56.005520
8. Wang Q, Zhao J, Shan B, Li X. A novel method for laser radar cross section calculation of complex laser targets with partial and gaussian beam irradiation. *Laser Phys*. 2018;28:126207 p. **DOI:** 10.1088/1555-6611/aae0da
9. Wang Q, Zhao J. LRCS model verification based on the feature selective validation method. *Optics and Laser Technology*. 2019;115:384-389. **DOI:** 10.1016/j.optlastec.2019.02.050
10. Han Y, Sun H, Li Y, Guo H. Fast calculation method of complex space targets optical cross section. *Applied Optics*. 2013;52(17):4013-4019. **DOI:** 10.1364/AO.52.004013
11. Nicodemus FE. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface. *Applied Optics*. 1965;4(7):767-775. **DOI:** 10.1364/AO.4.000767
12. Lu M, Zhang S, Wang Z. Establishment and verification of diffraction brdf model for scratched material surface. *Optics and Lasers in Engineering*. 2021;142:106597. **DOI:** 10.1016/j.optlaseng.2021.106597
13. Abramowitz M, Stegun IA. (Eds.) *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*, Dover Publications, Inc., New York, 1972.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

# Особенности распространения акустических нормальных волн в тонких пористых листах терморасширенного графита

О.В. Муравьева<sup>1,2</sup>, А.В. Блинова<sup>1</sup>, Л.А. Денисов<sup>1</sup>, О.П. Богдан<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,  
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

<sup>2</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 18.07.2024

Принята к печати 05.09.2024

Терморасширенные графиты относятся к новому классу графитовых материалов, обладающих уникальными физико-химическими и механическими свойствами. Скорость акустических волн – одна из важнейших характеристик при исследованиях пористых материалов, в том числе, тонких пористых листов терморасширенного графита. В статье экспериментально исследованы особенности распространения симметричной моды S0 волны Лэмба и SH-волны горизонтальной поляризации в листах терморасширенного графита. Для определения скоростей использована дифференциальная схема измерений, реализованная на базе низкочастотного акустического дефектоскопа DIO1000 LF и специализированных пьезопреобразователей с сухим точечным контактом. Дополнительно определена скорость продольной волны в направлении толщины листа с использованием пьезопреобразователей на основе поливинилиденфторида. Построены индикатрисы скоростей нормальных волн в плоскости проката и показано, что максимальная акустическая анизотропия его свойств характерна для используемой S0 моды, при этом минимум скорости соответствует продольному направлению плоскости проката, в котором наблюдается максимальная вытянутость газовых пор. Исследовано влияние толщины и плотности листов терморасширенного графита на скорость нормальных волн и показано наличие области толщин, где наблюдается их минимальное значение вследствие максимальной неоднородности слоёв, формируемых в процессе прокатки. Предложена методика определения динамических упругих модулей пористых листов терморасширенного графита по данным экспериментально измеренных скоростей нормальных волн и показано, что в продольном направлении плоскости проката коэффициент Пуассона принимает отрицательное значение, что позволяет отнести указанный материал к ауксетикам.

**Ключевые слова:** листы терморасширенного графита, акустические нормальные волны, скорость волн, акустическая анизотропия, динамические упругие модули

---

**Адрес для переписки:**

Муравьева О.В.  
Ижевский государственный технический университет  
имени М.Т. Калашникова,  
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия  
e-mail: pmkk@istu.ru

**Address for correspondence:**

Muravieva O.V.  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia  
e-mail: pmkk@istu.ru

---

**Для цитирования:**

О.В. Муравьева, А.В. Блинова, Л.А. Денисов, О.П. Богдан.  
Особенности распространения акустических нормальных волн  
в тонких пористых листах терморасширенного графита.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 213–230  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

**For citation:**

Muravieva OV, Blinova AV, Denisov LA, Bogdan OP.  
The Peculiarities of Acoustic Normal Waves Propagation in Thin  
Porous Sheets of Thermally Expanded Graphite.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):213–230. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

# The Peculiarities of Acoustic Normal Waves Propagation in Thin Porous Sheets of Thermally Expanded Graphite

O.V. Muravieva<sup>1,2</sup>, A.V. Blinova<sup>1</sup>, L.A. Denisov<sup>1</sup>, O.P. Bogdan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

<sup>2</sup>Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 18.07.2024

Accepted for publication 05.09.2024

## Abstract

Thermally expanded graphite belongs to a new class of graphite materials with unique physical, chemical and mechanical properties. Acoustic wave velocity is one of the most important characteristics for study of porous materials including thin porous sheets of thermally expanded graphite. In this paper peculiarities of symmetric mode S0 Lamb wave propagation and SH-wave with horizontal polarization in sheets of thermally expanded graphite are experimentally investigated. To determine their velocities a differential measurement scheme on the base of a low-frequency acoustic flaw detector DIO1000 LF and specialized piezoelectric transducers with dry point contact was used. Additionally the longitudinal wave velocity in direction of sheet thickness was determined using piezoelectric transducers based on polyvinylidene fluoride. Indicatrices of normal wave velocities in the rolling plane were plotted and it was shown that the maximum acoustic anisotropy is characteristic for the S0-mode. The velocity minimum corresponds to the longitudinal direction of the rolling plane in which the maximum elongation of gas pores was observed. Influence of thickness and density of thermally expanded graphite sheets on the velocities of normal waves was investigated and presence of the thickness range where the minimum velocity values were observed due to the maximum inhomogeneity of layers formed in the rolling process. Method for determination of dynamic elastic moduli of porous thermally expanded graphite sheets using experimentally measured velocities of normal waves was proposed. It was shown that in the longitudinal direction of the rolling plane the Poisson's ratio took negative values which allow to attribute the specified material to auxetics ones.

**Keywords:** thermally expanded graphite sheets, acoustic normal waves, velocity, acoustic anisotropy, dynamic elastic moduli

---

### Адрес для переписки:

Муравьева О.В.  
Ижевский государственный технический университет  
имени М.Т. Калашникова,  
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия  
e-mail: pmkk@istu.ru

### Address for correspondence:

Muravieva.O.V.  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia  
e-mail: pmkk@istu.ru

---

### Для цитирования:

О.В. Муравьева, А.В. Блинова, Л.А. Денисов, О.П. Богдан.  
Особенности распространения акустических нормальных волн  
в тонких пористых листах терморасширенного графита.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С.213–230.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

### For citation:

Muravieva OV, Blinova AV, Denisov LA, Bogdan OP.  
The Peculiarities of Acoustic Normal Waves Propagation in Thin  
Porous Sheets of Thermally Expanded Graphite.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):213–230. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

## Введение

Терморасширенные графиты (ТРГ) относятся к новому классу графитовых материалов, обладающих уникальными физико-химическими и механическими свойствами. Получение ТРГ включает несколько стадий: интеркаляция (взаимодействие графита с кислотами в присутствии окислителя); гидролиз интеркалированных соединений графита с образованием окисленного графита; терморасширение окисленного графита при резком нагреве до высоких температур. Полученный ТРГ обладает высокой удельной поверхностью и пористостью, что позволяет прессовать его в изделия различной формы и плотности. Прессование или прокатка ТРГ приводит к сцеплению червеобразных частиц без применения связующего и получению спрессованного материала – гибкой графитовой фольги различной толщины и плотности [1].

Графитовая фольга обладает уникальным комплексом эксплуатационных характеристик, ключевыми из которых являются: стойкость к воздействию высоких температур; высокая термостабильность; высокая теплопроводность; стойкость к воздействию химически агрессивных сред; высокая степень сжимаемости и восстанавливаемости после снятия давления; стойкость к истиранию и ударным нагрузкам, прочность и гибкость; низкий коэффициент трения; высокая электропроводность [2].

Указанные свойства обеспечивают использование графитовой фольги для улучшения эксплуатационных характеристик и надёжности разъёмных соединений трубопроводной арматуры, сосудов, аппаратов, насосов, компрессоров и другого оборудования, работающего под давлением в нефте- и газодобыче, химической, нефтеперерабатывающей, машиностроительной, металлургической, энергетической, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности, а также в атомной энергетике [3].

Несмотря на длительный период изучения, в настоящее время к исследованию технологий изготовления, структуры и физико-химических и механических свойствам ТРГ сохраняется большой интерес в связи с разнообразием технологических применений [4–6]. Вопросам экспериментальной оценки коэффициента

прохождения и его неравномерности по площади для пористых листов ТРГ посвящены работы [7, 8].

Скорость акустических волн – одна из важнейших характеристик при исследованиях новых перспективных материалов и изделий. Знание скоростей акустических волн необходимо как при разработке методик дефектоскопии материалов и изделий на наличие несплошностей, так и при решении задач акустической структуроскопии. Методы акустической структуроскопии успешно используются для определения динамических упругих модулей материалов [9–13] благодаря наличию однозначных связей со скоростями и плотностью материалов; при оценке остаточных напряжений с использованием метода акустоупругости [14–16]; при оценке циклического нагружения на материал [17–19]; при оценке структуры и физико-механических свойств (твёрдость, качество термообработки, качество упрочнения и др.) [20–24] за счёт выявленных корреляционных связей со скоростями акустических волн.

Теория распространения акустических волн в пористых средах использует преимущественно уравнения Био [25]. Теоретические исследования скоростей акустических волн, распространяющихся в пористом материале, и их связи с упругими свойствами среды основаны на применении различных теорий, уравнений и моделей, дополняемых к классическим представлениям новыми граничными условиями, упрощениями и дополнениями [26–28].

Теоретические и экспериментальные исследования направлены на изучение взаимосвязи скорости акустической волны с плотностью и пористостью материала, размером, распределением и ориентацией пор [29]. В частности, показано, что увеличение пористости материала приводит к уменьшению скорости продольной волны, при этом влияние на скорость поперечной волны отсутствует [30]. Установлены зависимости скорости акустической волны, распространяющейся в пористом материале, от её частоты, что позволило получить дисперсионные кривые, описывающие акустические свойства пористого материала [31–33]. Анализ дисперсии акустических волн в пористых материалах показывает возможность возникновения на определённых частотах резонансов, приводящих к различным

видам колебаний пор, и возможности проявления пористыми средами при определённых условиях свойств метаматериалов с отрицательными инерционными и упругими свойствами [30, 34, 35].

Особый интерес представляет исследование «медленной» продольной акустической волны (волны сжатия II типа), возникающей при определённых резонансных частотах. Показано, что продольная волна второго типа зависит от свойств материала, заполняющего поры [36] и практически полностью поглощается при длине волны, намного превышающей толщину образца [37]. Активно исследуются возможности измерения скоростей распространения акустической волны в пористых средах для задач акустической структурографии: определение температуры среды [38], исследование эффектов смачивания и гидратации в насыщенных жидкостью пористых средах [39], состава газа в порах [40].

Экспериментальные измерения скорости акустической волны, распространяющейся в пористом материале, реализуются преимущественно с использованием продольных, поперечных и поверхностных волн звукового и ультразвукового диапазона. Имеются сведения об использовании для исследований направленных волн горизонтальной поляризации [41], а также возможностях использования для исследований методов широкополосной лазерно-ультразвуковой спектроскопии [33].

Листы ТРГ представляют собой тонкий пористый материал с неоднородной

структурой по толщине (слоем закрытых пор с поверхностями) и анизотропией свойств по площади, обусловленных технологией прокатки. Следует отметить, что в общем случае, скорость акустических волн в пористой среде определяется рядом параметров (пористость, эффективные упругие модули насыщенного материала; упругие модули скелета и среды, заполняющей поры (газ, жидкость), зависящих как от свойств твёрдой фазы и поровой среды, так и от многих других факторов (геометрии порового пространства, характера контактов в скелете, эффективного давления и др.) [26], многие из которых применительно к ТРГ являются неизвестными величинами и могут быть определены только эмпирически.

Цель работы: экспериментальные исследования особенностей распространения акустических волн в тонких пористых листах терморасширенного графита, определение их упругих модулей и оценка анизотропии акустических свойств как в плоскости проката, так и по его толщине.

## Методика эксперимента

Экспериментально исследованы листы терморасширенного графита в количестве 5 образцов различной толщины  $h$  в диапазоне от 0.2 до 1.5 мм, с плотностью в диапазоне 850–970 кг/м<sup>3</sup>. Характеристики исследованных листов терморасширенного графита (толщина  $h$ , плотность  $\rho$  и поверхностная плотность  $\rho h$ ) представлены в таблице 1.

Таблица 1/ Table 1

## Характеристики исследуемых образцов терморасширенного графита

### Characteristics of investigated thermally expanded graphite samples

№ образца No.	Толщина листа $h$ , мм Sheet thickness $h$ , mm	Плотность листа $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> Sheet density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Поверхностная плотность $\rho h$ , кг/м <sup>2</sup> Surface density $\rho h$ , kg/m <sup>2</sup>
1	1.52	940	1.429
2	1.03	970	0.999
3	0.6	850	0.511
4	0.4	910	0.364
5	0.2	885	0.177

В тонких пластинах возможно существование нормальных волн Лэмба, формируемых вследствие последовательного отражения и интерференции плоских волн, падающих и отражающихся от стенок волновода. Нормальные волны Лэмба подразделяются на осесимметричные продольные (S), антисимметричные изгибные (A) и поперечные волны горизонтальной поляризации (SH-волны). Основной характеристикой нормальных волн являются дисперсионные кривые, характеризующие зависимости групповых и фазовых скоростей от частоты колебаний и толщины листа.

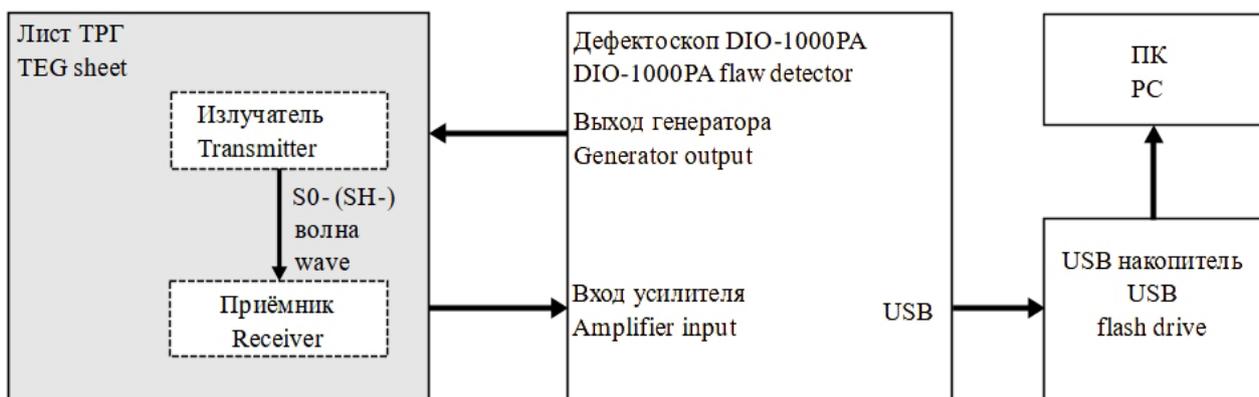
В области минимальной дисперсии скорости при  $fh \rightarrow 0$  ( $h$  – толщина листа,  $f$  – частота волны) фазовая и групповая скорости нулевой моды симметричной волны S0 не зависят от частоты и определяются только плотностью  $\rho$  материала и упругими свойствами среды (модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ ) [42]:

$$C_{S0} |_{fh \rightarrow 0} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}. \quad (1)$$

При этом скорость нулевой симметричной моды SH-волны горизонтальной поляризации равна скорости объемной поперечной волны во всем диапазоне частот:

$$C_{SH} = C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (2)$$

Для измерения скоростей распространения нормальных акустических волн в образцах ТРГ использована информационно-измерительная система, собранная на базе низкочастотного акустического дефектоскопа DIO1000 LF (рисунок 1). Для экспериментального возбуждения и приёма SH-волны и симметричной моды S0 волны Лэмба использованы пьезопреобразователи (ПЭП) с сухим точечным контактом с рабочей частотой 75 кГц, обеспечивающие передачу колебаний, направленных тангенциально к поверхности листа. Изменяя взаимную ориентацию ПЭП, возможно добиться излучения (приёма) SH-волны с поляризацией поперёк направления распространения либо симметричной моды S0 волны Лэмба с поляризацией вдоль направления распространения. ПЭП подключались в раздельном варианте к низкочастотному дефектоскопу DIO 1000 LF. Особенностью низкочастотного дефектоскопа DIO 1000 LF является возможность сохранения регистрируемого импульса с частотой дискретизации 200 МГц для дальнейшей численной обработки, что обеспечивает точность определения временных интервалов 5 нс. Вид осциллограммы, получаемой при прозвучивании образцов листов ТРГ SH-волной иллюстрирует рисунок 2.



**Рисунок 1** – Схема определения скоростей моды S0 волны Лэмба и SH-волны горизонтальной поляризации в плоскости прокатки

**Figure 1** – Scheme for determination of velocities of S0 Lamb wave mode and of horizontally polarized SH-wave in the rolling plane

С целью учёта времени в ПЭП и времени отсчёта импульса использована диффе-

ренциальная схема измерений времени его прохождения согласно рисунку 3а.

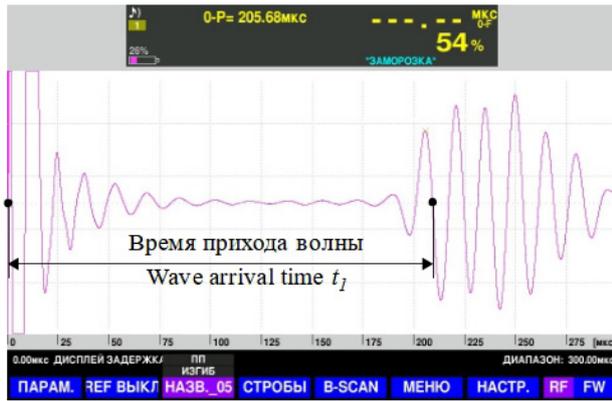


Рисунок 2 – Эхограмма SH-волны при прозвучивании листа ТРГ

Figure 2 – Echogram of the SH-wave during sonic test of the TEG sheet

Скорости нормальных волн  $C_{S0}$  и  $C_{SH}$  определялись по формуле:

$$C_{S0,SH} = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1}, \quad (3)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – времена прихода акустических импульсов, прошедших расстояния  $l_1$  и  $l_2$  – соответственно.

Ввиду невозможности точного определения времени начала импульса на фоне зондирующего импульса, время прихода импульса регистрировалось по точке перехода через ноль второго периода колебаний (рисунок 2).

Временная задержка в пьезопреобразователе  $t_p$ , обусловленная особенностями его конструкции, и учётом переноса точки измерений из начала импульса (рисунок 2), может быть определена согласно формуле:

$$t_p = \frac{l_2 t_1 - l_1 t_2}{l_2 - l_1}, \quad (4)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – времена прихода волны на базе  $l_1$  и  $l_2$  соответственно.

Измерения проведены на базах  $l_1 = 200$  мм и  $l_2 = 400$  мм. Схема измерений угловой диаграммы скоростей нормальных волн относительно отклонения направления распространения и поляризации волн от направления проката листа ТРГ, позволяющая оценить анизотропию акустических свойств листа, представлена на рисунке 3б. Преобразователи перемещались по круговому шаблону с шагом, равным 15 градусам.

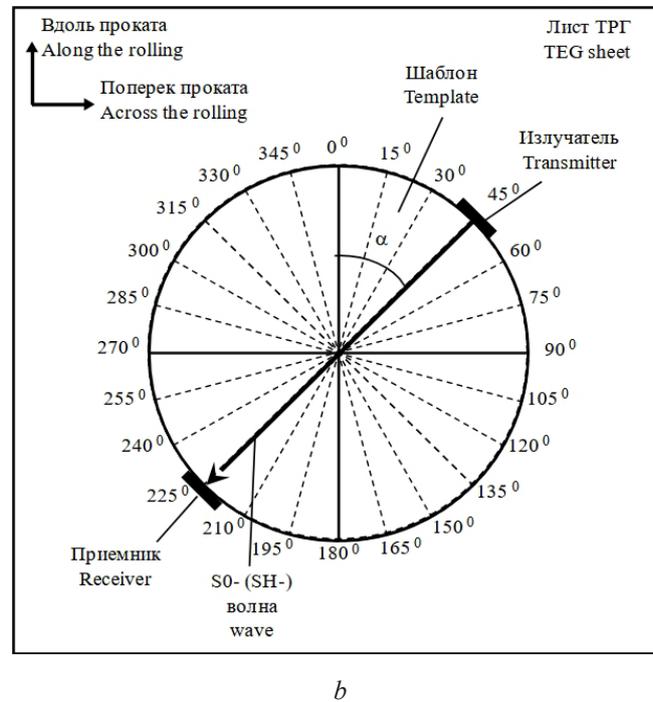
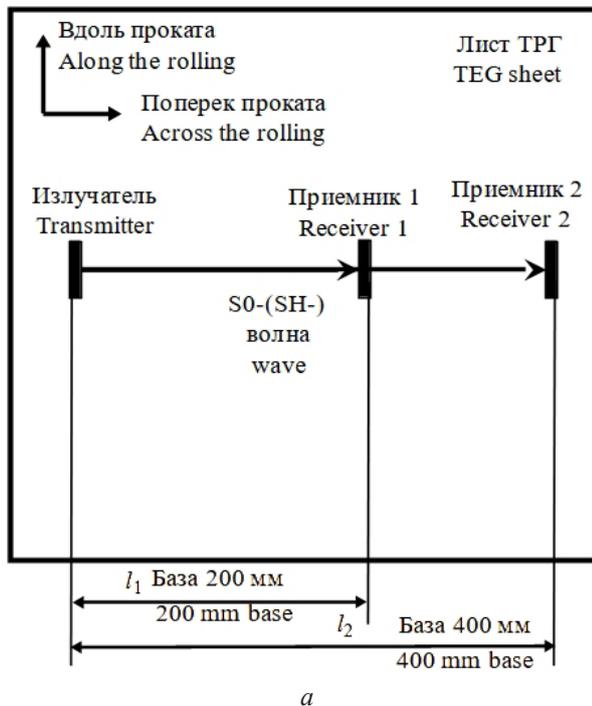


Рисунок 3 – Дифференциальная схема определения скоростей S0 и SH волн (a) и схема измерений угловой диаграммы скоростей нормальных волн относительно направления в плоскости проката (b)

Figure 3 – Differential scheme for determination of S0- and SH-waves' velocities (a) and measurement one of wave velocities' angular diagrams relative to the rolling direction (b)

Угловая зависимость скорости акустических нормальных волн определялась по формуле:

$$C(\alpha) = \frac{l}{t(\alpha) - t_p}, \quad (5)$$

где  $l$  – расстояние, пройденное волной ( $l = 400$  мм);  $t(\alpha)$  – время прихода импульса волны, распространяющейся в направлении.

Расчёт коэффициентов анизотропии  $R_a$  произведён из условия разницы скоростей волн в продольном  $C_{0^\circ}$  и поперечном  $C_{90^\circ}$  направлениях в плоскости проката:

$$R_a = 2 \left( \frac{C_{0^\circ} - C_{90^\circ}}{C_{0^\circ} + C_{90^\circ}} \right) \cdot 100\%. \quad (6)$$

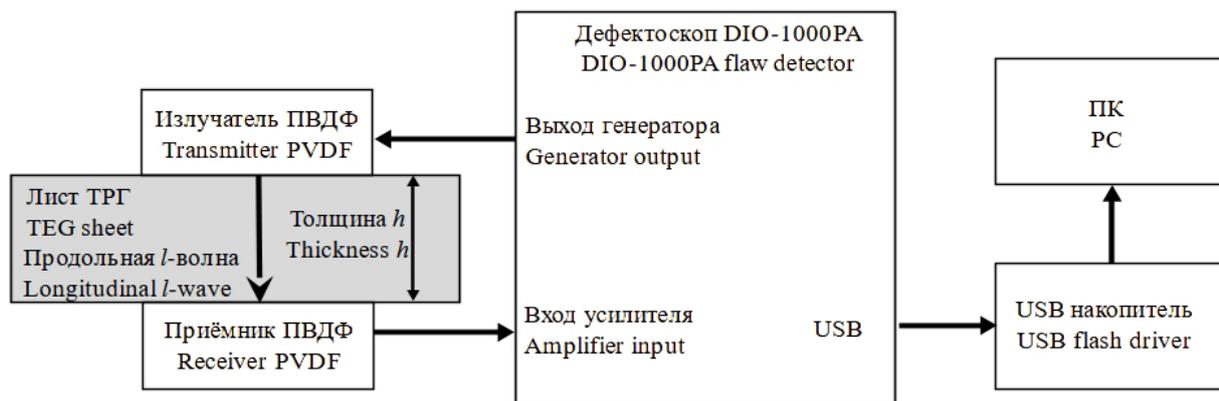
Дополнительно определена скорость продольной волны в направлении толщины листа (рисунок 4). В качестве акустических излучателей и приёмников использованы

пьезопреобразователи, где для генерации-приёма применены выполненные из поливинилиденфторида (ПВДФ) гибкие пьезоплёнки. Отличительной особенностью преобразователей на основе ПВДФ является возможность получения широкополосных и высокочастотных сигналов малой длительности для определения времени прихода акустической волны с высокой точностью, а также обеспечить наилучшее акустическое согласование контактирующих материалов.

Скорость  $C_l$  продольной волны в направлении толщины образца  $h$  с учётом времени задержки в преобразователе  $t_{PVDF}$  определяется по формуле:

$$C_l = \frac{h}{t - t_{PVDF}}, \quad (7)$$

где  $t$  – время между зондирующим и прошедшим импульсами.



**Рисунок 4** – Схема определения скорости продольной волны в толщине образца с использованием пьезопреобразователя на основе ПВДФ

**Figure 4** – Scheme for determination of the longitudinal wave velocity through the thickness of the specimen using a PVDF-based piezoelectric transducer

По измеренным скоростям  $C_{SH}$  и  $C_{S0}$  акустических нормальных волн появляется возможность определения динамических упругих модулей материала ТРГ. Решение системы уравнений (1)–(2) с учётом известной формулы связи упругих модулей  $E$  и  $G$ :

$$G = E/2(1+\nu); \quad (8)$$

позволяет получить следующие формулы для – модуля Юнга  $E$ :

$$E = C_{S0}^2 \cdot \rho(1-\nu^2); \quad (9)$$

– модуля сдвига  $G$ :

$$G = C_{SH}^2 \cdot \rho; \quad (10)$$

– коэффициента Пуассона:

$$\nu = \frac{C_{S0}^2 - 2C_{SH}^2}{C_{S0}^2}. \quad (11)$$

Как правило, определение упругих модулей производят выборочно с использованием разрушающих испытаний, получая значения статических упругих модулей. Учитывая сложность определения

предела пропорциональности на диаграмме механического нагружения листов ТРГ, возможность определения динамических упругих модулей по измеренным скоростям акустических нормальных волн является единственно возможным методом определения модулей упругости листов ТРГ в технологическом цикле изготовления.

Расчёт косвенных методических погрешностей определения величин плотности, скорости и упругих модулей при погрешности измерения массы с использованием весов Kromatech Pocket Scale МН-200 – 5 мг, измерения линейных размеров образца с использованием линейки измерительной металлической 500 мм по ГОСТ 427-75 – 0,5 мм, измерения толщины образца с использованием микрометра МК Ц 25, ГОСТ 6507-90 – 0,5 мкм, измерения времени – 50 нс (при частоте дискретизации 200 МГц)

на примере образца № 1 представлен в таблице 2.

Для оценки случайной погрешности измерения проводились по пять раз в каждой зоне исследуемых образцов. Следует отметить, что экспериментальное определение скорости продольной волны по толщине образца с высокой точностью сопряжено со сложностями реализации методики импульсного временно-теневоего метода. Случайные погрешности измерений обусловлены малой базой прозвучивания и неравномерностью толщины стенки листа; сложностью надёжного позиционирования измерительного инструмента на легко деформируемой поверхности; возможными различиями локальной плотности (в точке измерений) от интегральной (измеренной на листе в целом) вследствие разноплотности.

Таблица 2/Table 2

### Косвенные погрешности определения физических величин

#### Indirect errors of determination of physical quantities

Плотность $\Delta\rho$ , кг/м <sup>3</sup> Density $\Delta\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Скорость моды S0 $\Delta C_{S0}$ , м/с Velocity of the S0-mode $\Delta C_{S0}$ , m/s	Скорость SH-волны $\Delta C_{SH}$ , м/с Velocity of the SH-wave $\Delta C_{SH}$ , m/s	Скорость продольной волны $\Delta C_l$ , м/с Velocity of the longitudinal wave $\Delta C_l$ , m/s	Модуль сдвига $\Delta G$ , ГПа Shear modulus $\Delta G$ , GPa	Коэффициент Пуассона, $\Delta\nu$ Poisson's, ratio $\Delta\nu$	Модуль Юнга $\Delta E$ , ГПа Young's modulus $\Delta E$ , GPa
2.5	25	20	4	0.05	0.006	0.01

### Результаты и обсуждение

Типичные картины углового распределения скоростей (индикатриса скорости) моды S0 волны Лэмба и SH-волны в зависимости от направления распространения (поляризации) волн относительно направления проката в декартовой и цилиндрической системе координат для образца №1 показаны на рисунках 5 и 6.

Для моды S0 волны Лэмба (рисунок 5) в продольном направлении плоскости проката наблюдается максимальное значение скорости (около 2330 м/с), при этом минимальное значение (около 1885 м/с) соответствует направлению 90° (поперёк проката). Различия в значениях скоростей в направлении проката и под углом 90° достаточно существенно и составляет около 450 м/с или 20 %.

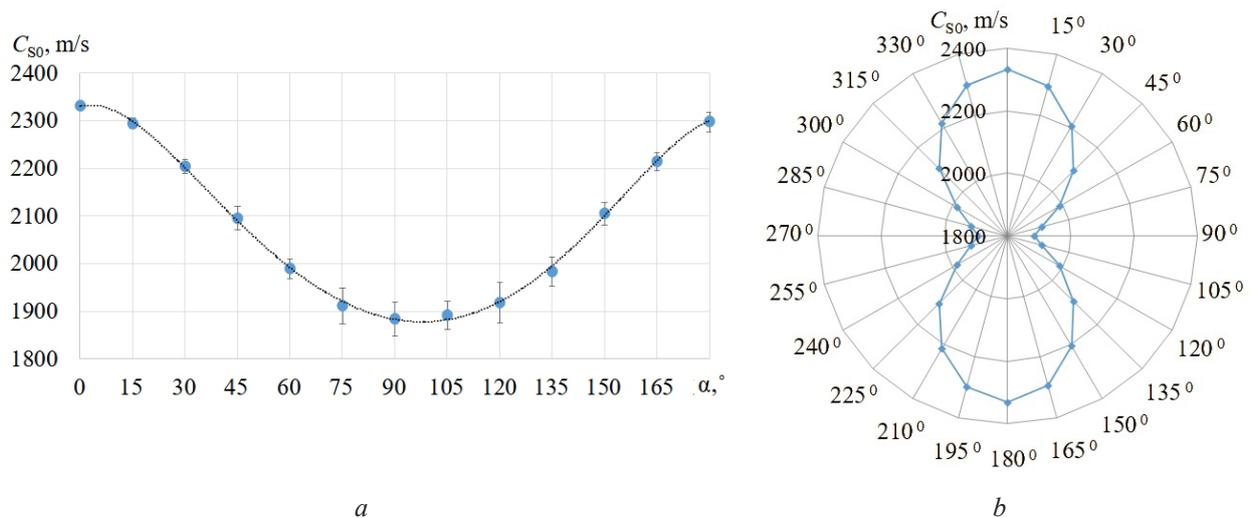
В отличие от моды S0 волны Лэмба скорость SH-волны имеет минимальные значения в направлениях 30–60° относительно направления проката, а максимальные – в продольном и поперечном направлениях плоскости проката, при этом различие в скоростях в сравнении с модой S0 не превышает 30 м/с или 2 % и соизмеримо с косвенной погрешностью измерений.

Следует отметить, что согласно теории Гассмана о распространении акустических волн в пористых средах основным допущением является независимость модуля сдвига  $G$  двухфазной среды от свойств газообразной фазы [26]. Последнее позволяет предположить, что SH-волна горизонтальной поляризации может передаваться только по твёрдой фазе или

скелету ТРГ. При этом симметричная волна с продольной поляризацией и деформацией растяжения-сжатия переносится частицами двухфазной системы (ТРГ – воздух).

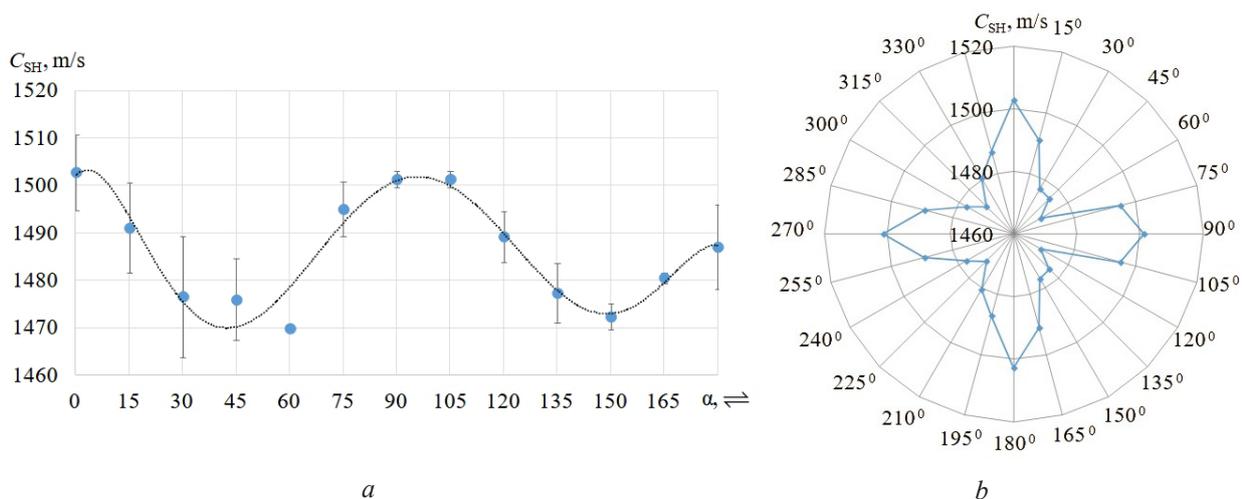
Учитывая, что процесс прокатки вытягивает воздушные поры преимущественно вдоль направления проката, последнее ведёт к формированию композитного материала ТРГ как слоистой среды, в которой связующим является скелет терморасширенного графита,

а слоями – вытянутые воздушные поры. При этом наблюдается эффект акустического каналирования, при котором скорость акустических волн, распространяющихся вдоль слоёв, существенно выше, чем поперёк слоев. Указанный эффект подтверждается экспериментальными работами по исследованию скоростей акустических волн в однонаправленных композитах [43, 44], а также теорией слоистых сред [45].



**Рисунок 5** – Зависимости скорости  $C_{S0}$  моды S0 волны Лэмба от углового направления распространения  $\alpha$  в плоскости проката в декартовой (a) и цилиндрической (b) системах координат для образца № 1

**Figure 5** – Dependences of the Lamb wave S0-mode velocity  $C_{S0}$  on the propagation angle direction  $\alpha$  in the rolling plane in Cartesian (a) and cylindrical (b) coordinate systems for specimen No 1



**Рисунок 6** – Зависимости скорости  $C_{SH}$  SH-волны от углового направления распространения  $\alpha$  в плоскости проката в декартовой (a) и цилиндрической (b) системах координат для образца № 1

**Figure 6** – Dependences of SH-wave velocity  $C_{SH}$  on the propagation angle direction  $\alpha$  in the rolling plane in Cartesian (a) and cylindrical (b) coordinate systems for specimen No 1

Поведение индикатрисы скорости SH-волны относительно направлений в плоскости проката может быть описано согласно представлениям о кристаллической структуре ТРГ, идентичной исходному графиту с гексагональной решёткой [4], при этом схема ориентирования плоскостей гексагональной решётки при плоской прокатке соответствует

базисной системе лёгкого скольжения – (1120). Согласно ориентации кристаллографических осей в гексагональной решётке графита максимум значений скорости SH-волны соответствует направлению [1010] (продольное направление в плоскости проката) и направлению [1210] (поперечное направление в плоскости проката), а минимум – направлениям [2110] (30, 60°).

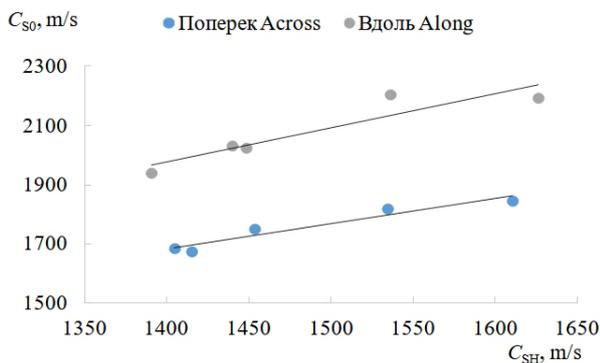
Таблица 3/ Table 3

**Результаты определения скоростей упругих волн и акустической анизотропии**

**Results of elastic wave velocities and acoustic anisotropy determination**

№ образца No	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$h$ , мм $h$ , mm	$\rho h$ , кг/м <sup>2</sup> $\rho h$ , kg/m <sup>2</sup>	$C_{S0}$ , м/с		$R_a$ , %	$C_{SH}$ , м/с		$C_l$ , м/с $C_l$ , m/s	
				Вдоль проката Along the rolling	Поперек проката Across the rolling		Вдоль проката Along the rolling	Поперек проката Across the rolling		
1	940	1.52	1.429	2204±3	1818±3	19.2	1536±6	1535±7	0.11	352±8
2	970	1.03	0.999	2031±3	1674±2	19.3	1439±8	1415±4	1.72	361±8
3	851	0.6	0.511	1939±3	1684±4	14.1	1390±6	1405±4	-1.02	555±2
4	910	0.4	0.364	2024±5	1750±3	14.5	1449±8	1454±4	-0.36	450±1
5	887	0.2	0.177	2193±4	1845±2	17.2	1626±3	1610±11	0.97	-

Результаты определения скоростей упругих волн и акустической анизотропии для пяти исследованных образцов представлены в таблице 3. Как видно, имеется однозначная связь скоростей моды S0 волны Лэмба и скорости SH-волны, как вдоль, так и поперёк проката (рисунок 7).



**Рисунок 7** – Корреляция скоростей  $C_{S0}$  моды S0 волны Лэмба и  $C_{SH}$  SH-волны в продольном и поперечном направлениях плоскости проката

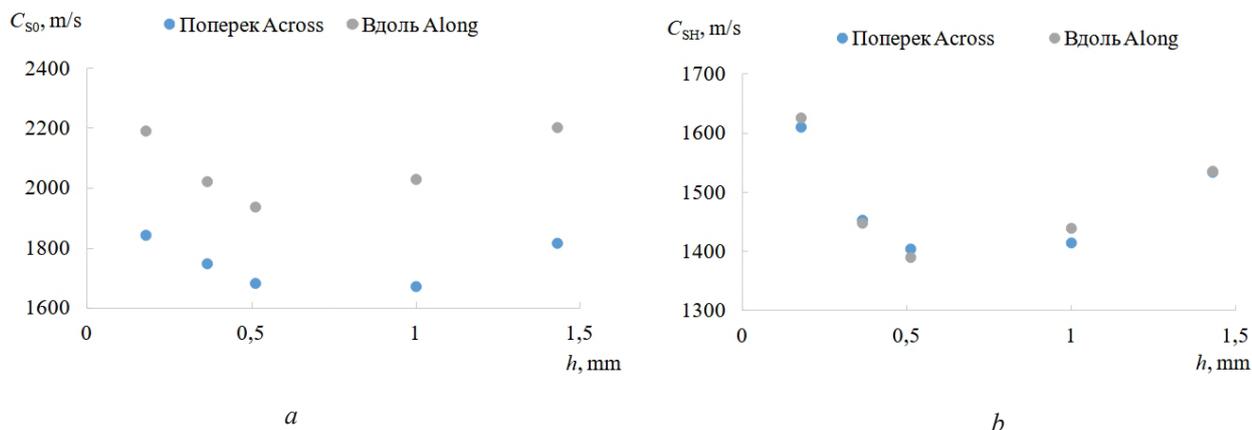
**Figure 7** – Correlation of Lamb wave S0-mode  $C_{S0}$  and SH-wave  $C_{SH}$  velocities in longitudinal and transverse directions of the rolling plane

Влияние толщины исследованных листов на скорости моды S0 волны Лэмба и скорости SH-волн иллюстрирует рисунок 8. Полагаем, что влияние толщины листа является определяющим, ввиду того, что значения плотности исследованных листов меняются в небольших пределах (от 885 до 970 кг/м<sup>3</sup>), а значения толщины – в существенно больших пределах (от 0,2 до 1,5 мм) (таблица 1).

Необходимо отметить, что для всех исследованных образцов наблюдается неоднозначная зависимость скоростей нормальных волн от толщины листа с минимальным значением в области толщин 0,6–0,8 мм. Последнее может быть обусловлено значительной неоднородностью структуры по толщине листа вследствие совместного влияния более плотных поверхностных слоёв с закрытыми порами и центрального менее плотного пористого слоя, что обусловлено технологией проката. Тонкие листы (0,2 мм) являются более однородными по структуре ввиду двустороннего формирования более плотных поверхностных слоёв (рисунок 9a). Толстые листы (1 мм и более) имеют более равномерную структуру

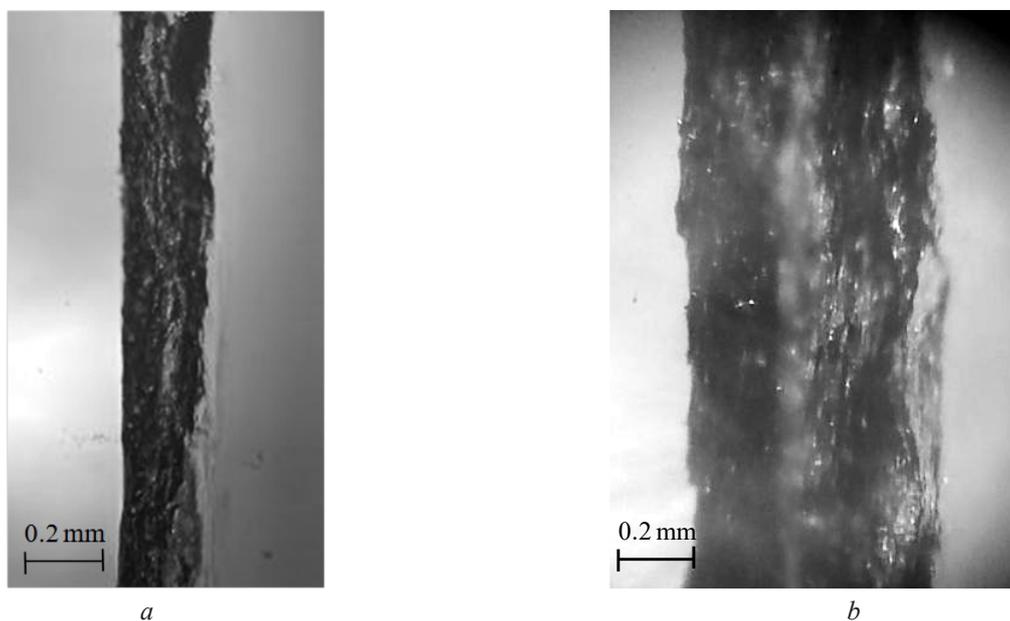
ввиду меньшего влияния толщины плотных поверхностных слоёв в сравнении с внутренним менее плотным пористым слоем большей толщины. Для листов толщиной 0,6–0,8 мм толщина поверхностных слоёв соизмерима с толщиной внутреннего слоя, а, следовательно, имеет более неравномерную структуру

(рисунок 9b). Учитывая, что для моды S0 волны Лэмба и SH-волны горизонтальной поляризации в низкочастотном диапазоне имеет место равномерная эпюра смещений по толщине листа, степень неравномерности структуры по толщине листа ТРГ оказывает существенное влияние на их скорости.



**Рисунок 8** – Зависимости скоростей  $C_{S0}$  и  $C_{SH}$  волн, распространяющихся вдоль и поперёк проката от толщины листов терморасширенного графита  $h$

**Figure 8** – Dependences of S0- and SH-waves velocities in longitudinal and transverse directions of the rolling plane on the thickness of thermally expanded graphite sheets  $h$

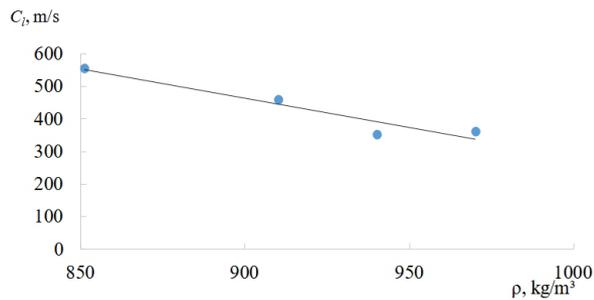


**Рисунок 9** – Фото макроструктуры поперечного сечения листов терморасширенного графита: № 1 (толщина  $h = 0,2$  мм) (a) и № 3 (толщина  $h = 0,6$  мм) (b)

**Figure 9** – Photo of thermally expanded graphite sheets' cross-section macrostructure for: No 1 (thickness  $h = 0.2$  mm) (a) и No 3 (thickness  $h = 0.6$  mm) (b) samples

Для продольных объёмных волн, распространяющихся по толщине листа, максимальная скорость соответствует минимальной плотнос-

ти листа (рисунок 10), что согласуется с известной корреляцией скорости  $C_l$  с модулем Юнга  $E$  и плотностью среды  $\rho$ :  $C_l \sim (E/\rho)^{0.5}$ .



**Рисунок 10** – Зависимость скорости  $C_l$  продольной волны в направлении толщины проката от плотности  $\rho$  листов терморасширенного графита

**Figure 10** – Dependence of the longitudinal compressive-tension wave velocity  $C_l$  in the thickness rolling direction on the density of thermally expanded graphite sheets  $\rho$

Представленные результаты оценки коэффициента акустической анизотропии исследованных листов по данным скоростей упругих мод, измеренных в продольном и поперечном направлениях плоскости проката, свидетельствуют о том, что наибольшие значения указанного коэффициента достигаются при использовании именно S0 моды (14–19 %) для исследованных листов ТРГ. В то же время применение SH моды для этой цели неэффективно ввиду пренебрежимо малого изменения исследуемой величины.

Следует отметить высокий уровень акустической анизотропии скоростей S0 моды,

распространяющейся вдоль проката и продольной волны – по толщине проката. При этом различие скоростей может достигать  $\approx 500\%$ . Полученные результаты не противоречат данным, полученным при исследовании анизотропии механических свойств [46], свидетельствующим о существенном увеличении предела прочности и упругих модулей в направлении параллельно ориентированных слоев графита в ТРГ (в плоскости проката). Кроме того, согласно справочным данным о свойствах ТРГ имеет место увеличение электрического сопротивления ТРГ в 50–100 раз, и уменьшение коэффициента теплопроводности в 20–30 раз в направлении по толщине проката в сравнении с направлением вдоль проката.

На основе полученных экспериментально данных о скоростях упругих волн и использованием формул (9)–(11) рассчитаны динамические упругие модули Юнга и сдвига и коэффициент Пуассона в продольном и поперечном направлениях плоскости проката, представленные в таблице 4. Как видно, модуль сдвига для листов различной толщины изменяется в диапазоне 1,7–2,4 ГПа и имеет практически одинаковые значения, измеренные в направлении как вдоль, так и поперёк проката. В то же время имеет место существенное различие модуля Юнга, измеренного в продольном и поперечном направлениях проката, что в среднем в полтора-два раза больше.

Таблица 4/ Table 4

### Результаты расчёта динамических упругих модулей

#### Results of dynamic elastic moduli calculation

№ образца No.	Модуль $G$ , ГПа Modulus $G$ , GPa		Модуль Юнга $E$ , ГПа Young's modulus $E$ , GPa		Коэффициент Пуассона $\nu$ Poisson's ratio $\nu$	
	Вдоль проката Along the rolling	Вдоль проката Along the rolling	Вдоль проката Along the rolling	Вдоль проката Along the rolling	Вдоль проката Along the rolling	Вдоль проката Along the rolling
1	2.22	2.21	4.56	2.55	0.03	-0.42
2	2.01	1.94	4.00	2.21	-0.01	-0.43
3	1.65	1.68	3.20	2.04	-0.03	-0.39
4	1.91	1.92	3.72	2.38	-0.02	-0.38
5	2.35	2.30	4.22	2.19	-0.10	-0.52

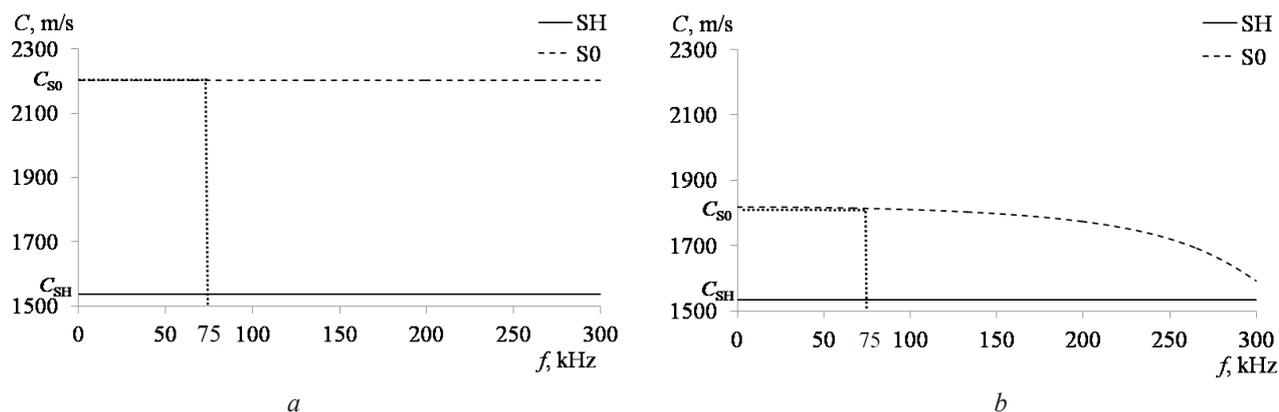
Весьма важно, что в продольном направлении плоскости проката коэффициент Пуассона,

характеризующий сопротивление материала поперечным деформациям, стремится к нулю,

что означает отсутствие поперечной деформации при растяжении в указанном направлении. В то же время, в поперечном направлении плоскости проката коэффициент Пуассона принимает отрицательные значения, что позволяет отнести указанный материал к ауксетикам, для которых характерно поперечное расширение при продольном растяжении. Полученные результаты не противоречат исследованиям других пористых струк-

тур (метаматериалов), которые проявляют ауксетические свойства [34, 35].

Полученные значения упругих модулей позволили рассчитать дисперсионные кривые фазовых и групповых скоростей SH-моды и симметричной S0 моды (волн Лэмба), используя программное обеспечение «Acoustic Waveguide Tracer» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013615397) (рисунок 11).



**Рисунок 11** – Дисперсионные кривые групповых скоростей  $C$  SH-волны и моды S0 в продольном (a) и в поперечном (b) направлениях в плоскости проката для образца № 1

**Figure 11** – Dispersion curves of the group velocities  $C$  of SH-wave and S0-mode in the longitudinal (a) and transverse (b) directions in the rolling plane for sample No 1

Видно, что в исследуемом диапазоне частот (75 кГц) в тонком листе наблюдается возбуждение бездисперсионной SH-волны. Для симметричной S0 моды проявляется дисперсия скорости (зависимость от частоты). Согласно рисунку 11 дисперсия её мала при распространении в продольном направлении в плоскости проката и проявляется в существенно большей степени в поперечном направлении. Полученные значения скоростей  $C_{SH}$  и  $C_{S0}$  при 75 кГц соответствуют экспериментальным значениям таблицы 3, что говорит об адекватности предложенной методики оценки динамических упругих модулей по измеренным скоростям нормальных волн.

## Заключение

Экспериментально исследованы особенности распространения акустических волн в тонких пористых листах терморасширенного графита (ТРГ). Показана возможность

эффективного возбуждения в таких листовых материалах симметричной S0 моды волны Лэмба и SH-моды, имеющей горизонтальную поляризацию, и достаточно точной оценки скоростей указанных мод в низкочастотной области. В результате исследования влияния толщины листов ТРГ на скорости нормальных мод установлено, что в области толщин 0,6–0,8 мм наблюдаются минимальные значения скоростей, что, как предполагается, вызвано весьма высокой неоднородностью структуры слоёв, формируемых в процессе прокатки.

Оценены индикатрисы скоростей нормальных волн в плоскости проката и показано, что максимальная акустическая анизотропия характерна для S0 моды, при этом максимум скорости соответствует направлению распространения её вдоль проката, в котором наблюдается максимальная вытянутость газовых пор.

Предложена методика определения динамических упругих модулей пористых листов ТРГ по экспериментально измеренным

скоростям нормальных волн и показано, что в поперечном направлении плоскости проката коэффициент Пуассона принимает отрицательные значения, что позволяет отнести указанный материал к ауксетикам.

## Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-29-10167, <https://rscf.ru/project/23-29-10167/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

## Acknowledgments

This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-29-10167, <https://rscf.ru/project/23-29-10167/>, and made use of the USF "Information and measurement complex for the study of acoustic properties of materials and products" (reg. no. 586308).

## Список использованных источников

1. Исаев О.Ю. Технология и аппаратурное оформление процесса производства уплотнительных материалов из терморасширенного графита / О.Ю. Исаев, Д.В. Смирнов, В.П. Лепихин [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. – 2006. № 4. – С. 76–79.

2. Яковлев А.В. Терморасширенный графит: синтез, свойства и перспективы применения (Обзор) / А.В. Яковлев, А.И. Финаенов, С.Л. Забудьков, Е.В. Яковлева // Журнал прикладной химии. – 2006. – Т. 79. – № 11. – С. 1761–1771.

3. Ханов А.М. Особенности строения и использования терморасширенного графита / А.М. Ханов, Л.Е. Макарова, А.И. Дегтярев [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14. № 1. – С. 92–106.

4. Murugan P. Recent trends in the applications of thermally expanded graphite for energy storage and sensors – a review / P. Murugan [et al.] // Nanoscale Advances. – 2021. – Vol. 3. – Pp. 6294–6309.

5. Караваев Д.М. Влияние структурно-морфологических особенностей терморасширенного графита на износостойкость композиционного материала с кремнийорганическим связующим / Д.М. Караваев, А.М. Ханов, Е.В. Матыгуллина,

Л.Д. Сиротенко // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 4(6). – С. 378–381.

6. Афанасов И.М. Теплопроводность и механические свойства терморасширенного графита / И.М. Афанасов [и др.] // Неорганические материалы. 2009. – Т. 45. – № 5. – С. 540–544.

7. Богдан О.П. Исследование плотности образцов из терморасширенного графита акустическим амплитудно-теневым методом / О.П. Богдан [и др.] // Дефектоскопия. – 2023. – № 8. – С. 21–31.

**DOI:** 10.31857/S0130308223080031

8. Богдан О.П. Экспериментальная оценка возможности обнаружения сквозных дефектов в заготовках из терморасширенного графита акустическим методом / О.П. Богдан [и др.] // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 97–105. **DOI:** 10.22213/2413-1172-2024-1-97-105

9. Макалкин Д.И. Измерение локальных модулей упругости конструкционных материалов с использованием лазерных источников ультразвука / Д.И. Макалкин [и др.] // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 502. – № 1. – С. 63–66. **DOI:** 10.31857/S2686740022010126

10. Шibaев И.А. Определение динамических модулей упругости образцов горных пород при использовании различных методов лазерной ультразвуковой диагностики / И.А. Шibaев // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. – № 4-1. – С. 138–147.

**DOI:** 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_138

11. Murav'eva O. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology / O. Murav'eva [et al.] // Additive Manufacturing. 2022, vol. 51, P. 102635.

**DOI:** 10.1016/j.addma.2022.102635

12. Муравьева О.В. Акустические свойства марганцено-старейшей стали ХМ-12 после энергетических воздействий / О.В. Муравьева [и др.] // Frontier Materials & Technologies. – 2024. – № 2. – С. 87–100. **DOI:** 10.18323/2782-4039-2024-2-68-8

13. Murav'ev V.V. Acoustic and Electromagnetic Properties of Maraging Iron–Chromium–Nickel Alloy with Addition of Copper in Mechanical Tension / V.V. Murav'ev, O.V. Murav'eva, A.L. Vladykin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2023. – Vol. 59. – No. 5. – Pp. 515–523.

**DOI:** 10.1134/s1061830923700365

14. Муравьев В.В. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В.В. Муравьев [и др.] // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 87–96.

**DOI:** 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96

15. Углов А.Л. О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Н17К10В10МТ / А.Л. Углов [и др.] // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 3–9.  
**DOI:** 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9
16. Муравьев В.В. Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки / В.В. Муравьев, А.Ю. Будрин, М.А. Синцов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 4–10.  
**DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-4-10
17. Mishakin V.V. On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy / V.V. Mishakin [et al.] // International Journal of Engineering Science. – 2021. – Vol. 168. – Pp. 103567.  
**DOI:** 10.1016/j.ijengsci.2021.103567
18. Хлыбов А.А. Исследование поврежденности образцов из стали 12Х18Н10Т при малоцикловой усталости методами неразрушающего контроля / А.А. Хлыбов, Ю.Г. Кабалдин, Д.А. Рябов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. – Т. 87. – № 5. – С. 61–67.  
**DOI:** 10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67
19. Абабков Н.В. Исследование дислокационной структуры, внутренних напряжений и перераспределения атомов углерода в зоне локализованной деформации в конструкционной стали 20 / Н.В. Абабков, В.И. Данилов, А.Н. Смирнов [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2024. – Т. 21. – № 1. – С. 112–121.  
**DOI:** 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.013
20. Бритенков А.К. Исследование методом акустического зондирования физико-механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного методом послойного лазерного сплавления / А.К. Бритенков, В.М. Родюшкин, А.В. Иляхинский // Физика и механика материалов. – 2021. – Т. 47. – № 1. – С. 139–158. **DOI:** 10.18720/МРМ.4712021\_14
21. Муравьев В.В. Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн / В.В. Муравьев, А.Ю. Будрин, М.А. Синцов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 37–43. **DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43
22. Baev A. Possibilities of using of surface and sub-surface waves' amplitude-angle characteristics for control of materials with surface-hardened inhomogeneous layer / A. Baev [et al.] // Devices and Methods of Measurements. 2022, vol. 13, no 4, pp. 263-275.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-4-263-275
23. Муравьев В.В. Структуроскопия витков пружин после высокотемпературной механической обработки на основе измерения скорости рэлеевских волн / В.В. Муравьев, Л.В. Гущина // Приборы и методы измерений. – 2022. – Т. 13. – № 2. – С. 147–154. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154
24. Муравьев В.В. Акустические и электромагнитные свойства заготовок стволов гражданских ружей / В.В. Муравьев и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21. – № 1. – С. 59–70. **DOI:** 10.22213/2410-9304-2023-1-59-70
25. Biot M.A. Acoustics, elasticity, and thermodynamics of porous media: twenty-one papers. New York: Acoustical Society of America, 1992. 265 p.
26. Князьков Н.Н. Акустика пористо-упругих насыщенных жидкостью сред (обзор теории Био) / Н.Н. Князьков, Б.П. Шарфарец // Научное приборостроение. – 2016. – Т. 26. – № 1. – С. 77–84.
27. Kidner M. A comparison and review of theories of the acoustics of porous materials / M. Kidner, C. Hansen // International Journal of Acoustics and Vibrations. 2008, vol. 13, pp. 1-27.
28. Jimenez N. Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials, and Porous Media: From Fundamentals to Industrial Applications / N. Jimenez, O. Umnova, J.-P. Groby // Topics in Applied Physics. Springer. 2021, 444 p. **DOI:** 10.1007/978-3-030-84300-7
29. Omella A.J. A simulation method for the computation of the effective P-wave velocity in heterogeneous rocks / A.J. Omella, J. Alvarez-Aramberri, M. Strugaru, et al. // Computational Mechanics. 2021, vol. 67, pp. 845-865. **DOI:** 10.1007/s00466-020-01966-3.
30. Ba A. Thomas Brunet Soft porous silicone rubbers with ultra-low sound speeds in acoustic metamaterials / A. Ba, A. Kovalenko, C. Aristégui, O. Mondain-Monval, T. Brunet // Scientific Reports. 2017, vol. 7, P. 40106. **DOI:** 10.1038/srep40106
31. Magliacano D. Computation of dispersion diagrams for periodic porous materials modeled as equivalent fluids / D. Magliacano [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. 2020, vol. 142, P. 106749. **DOI:** 10.1016/j.ymsp.2019.05.040
32. Dmitriev V.L. Propagation of Acoustic Waves in a Water-Saturated Porous Medium Formed by a Gas Hydrate / V.L. Dmitriev, I.G. Khusainov, I.K. Gimaltidinov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021, vol. 94, no. 6, pp. 1563-1570.  
**DOI:** 10.1007/s10891-021-02437-z
33. Sokolovskaya Y.G. Using Broadband Acoustic Spectroscopy with a Laser Source of Ultrasound to Study the Frequency Dependences of the Phase Velocity of Longitudinal Acoustic Waves in Porous Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites / Y.G. Sokolovskaya, N.B. Podymova, A.A. Karabutov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021, vol. 85, no. 1, pp. 93-97.  
**DOI:** 10.3103/S1062873821010251

34. Федотовский В.С. Пористая среда как акустический метаматериал с отрицательными инерционными и упругими свойствами / В.С. Федотовский // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64. – № 5. – С. 547–553. DOI: 10.1134/S0320791918050027

35. Бобровницкий Ю.И. Акустический метаматериал с необычными волновыми свойствами / Ю.И. Бобровницкий // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60. – № 4. – С. 347. DOI: 10.7868/S0320791914040017

36. Ситдикова Л.Ф. Акустические волны в пористых средах, насыщенных водой с пузырьками газа на стенках пор / Л.Ф. Ситдикова // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 5. – С. 36–42. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-5-36-42

37. Groby J.-P. The use of slow waves to design simple sound absorbing materials / J.-P. Groby, W. Huang, A. Lardeau, Y. Auregan // Journal of Applied Physics. 2015, vol. 117, no. 12. DOI: 10.1063/1.4915115

38. Guo J. Exploring Acoustic Wave Propagation and Equivalent Path in Quasi-Porous Medium of Loose Coal Mass / J. Guo [et al.] // Natural Resources Research. 2024, vol. 33, pp. 389–403. DOI: 10.1007/s11053-023-10297-y

39. Губайдуллин А.А. Скорость и поглощение линейных волн в пористых средах, насыщенных газом и его гидратом / А.А. Губайдуллин, О.Ю. Болдырева, Д.Н. Дудко // Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63. – № 4(374). – С. 56–63. DOI: 10.15372/PMTF20220406

40. Секоян С.С. Влияние пористости и дисперсности материалов на скорость распространения звуковых волн / С.С. Секоян [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – № 4(296). – С. 121–127.

41. Dai Z. The influence of slip boundary effect on the propagation of shear horizontal guided waves in a fluid-saturated porous medium / Dai Z. [et al.] // Journal of Engineering Mathematics. 2024, vol. 144, no. 15. DOI: 10.1007/s10665-023-10318-y

42. Rose J.L. Ultrasonic guided waves in solid media / Joseph L. Rose // Cambridge; New York: Cambridge University Press. 2014, 530 p.

43. Драчев К.А. Измерение скорости звука и коэффициента затухания в композиционных материалах на основе полимерных связующих с различной степенью армирования / К.А. Драчев, В.И. Римлянд, Т.В. Сяпина // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2020. – № 4(59). – С. 47–54.

44. Wilkinson S.J. The propagation of ultrasonic waves in carbon-fibre-reinforced plastics / S.J. Wilkinson, W.N. Reynolds // Journal of Physics D: Applied Physics. 2002, vol. 7, P. 50. DOI: 10.1088/0022-3727/7/1/313

45. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – 2-е изд. дополненное и переработанное. М.: Наука, 1973. – 340 с.

46. Караваев Д.М. Анизотропия механических свойств композиционного материала на основе терморасширенного графита / Д.М. Караваев [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1243–1245.

## References

1. Isaev OYu, Smirnov DV, Lepikhin VP, Belova MYu, Kolesova SM. Technology and the hardware solution of a process of manufacture of thickening materials from thermal expanded graphite. Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov. 2006;4:76-79. (In Russ.).

2. Yakovlev AV, Finaenov AI, Zabud'kov SL, Yakovleva EV. Thermally expanded graphite: Synthesis, properties, and prospects for use. Russian Journal of Applied Chemistry. 2006;79(11):1741-1751. DOI: 10.1134/S1070427206110012

3. Hanov AM, Makarova LE, Degtyarev AI, Karavaev DM, Moskalev VA, Nesterov AA, Smirnov DV, Isaev OYu. Structural and applications peculiarities of the expanded graphite. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie. 2012;14(1):92-106. (In Russ.).

4. Murugan P, Nagarajan RD, Shetty BH, Govindasamy M, Sundramoorthy AK. Recent trends in the applications of thermally expanded graphite for energy storage and sensors – a review. Nanoscale Advances. 2021;3: 6294-6309.

5. Karavaev DM, Khanov AM, Matygullina EV, Sirotenko LD. Vliyanie strukturno-morfologicheskikh osobennostei termorasshirennogo grafitna na iznosostoičnost' kompozitsionnogo materiala s kremniorganicheskim svyazuyushchim. Izvestiya Samarskogo nauchnogo Tsentra Rossiiskoi akademii nauk. 2013;15(4):378–381. (In Russ.).

6. Afanasov IM, Savchenko DV, Ionov SG, Rusakov DA, Seleznev AN, Avdeev VV. Thermal conductivity and mechanical properties of expanded graphite. Inorganic Materials. 2009;45(5):486-490. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0020168509050057

7. Bogdan OP, Muraveva OV, Blinova AV, Zlobin DV. Density study of thermoexpanded graphite samples by acoustic amplitude-shadow method. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023;8:21-31. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0130308223080031

8. Bogdan OP, Blinova AV, Denisov LA. Experimental Evaluation of the Possibility of Through Defects Detection in Thermally Expanded Graphite Workpieces

by Acoustic Method. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova. 2024;27(2):97-105. (In Russ.).

**DOI:** 10.22213/2413-1172-2024-1-97-105

9. Makalkin DI, Karabutov AA, Savateeva EV, Simonova VA. Measurement of local modules of elasticity of construction materials using laser ultrasonic sources. Doklady Physics. 2022;502(1):63-66. (In Russ.).

**DOI:** 10.31857/S2686740022010126

10. Shibaev IA. Determination of the dynamic elastic modulus of rock samples using various methods of laser ultrasound diagnostics. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2021;4-1:138-147. (In Russ.).

**DOI:** 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_138

11. Murav'eva O, Murav'ev V, Volkova L, Kazantseva N, Nichipuruk A, Stashkov A. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology. Additive Manufacturing. 2022;51:102635.

**DOI:** 10.1016/j.addma.2022.102635

12. Murav'eva OV, Murav'ev VV, Volkova LV, Vladynkin AL, Belosludtsev KYu. Acoustic properties of 15-5 PH maraging steel after energy deposition. Frontier Materials & Technologies. 2024;(2):87-100. (In Russ.).

**DOI:** 10.18323/2782-4039-2024-2-68-8

13. Murav'ev VV, Murav'eva OV, Vladynkin AL. Acoustic and Electromagnetic Properties of Maraging Iron–Chromium–Nickel Alloy with Addition of Copper in Mechanical Tension. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023;59(5):515-523.

**DOI:** 10.1134/s1061830923700365

14. Murav'ev VV, Khomutov AS, Murav'eva OV, Stepanova EA, Popova VD. Formation of Residual Stresses in the Cylinders of Deep-Rod Pumps after Manufacturing Operations. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova. 2024;27(2):87-96. (In Russ.).

**DOI:** 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96

15. Uglov AL, Khlybov AA, Bychkov AL, Kuvshinov MO. About non-destructive control of residual stresses in axisymmetric parts made of steel 03ni17co10w-10moti. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova. 2019;22(4):3-9. (In Russ.).

**DOI:** 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9

16. Murav'ev VV, Budrin AYu, Sintsov MA. Influence of High-Cycle Fatigue on the Speed of Shear and Rayleigh Waves in Steel Bars of Different Heat Treatment. Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2020;18(4): 4-10. (In Russ.). **DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-4-10

17. Mishakin VV, Gonchar AV, Kurashkin KV, Klyushnikov VA, Kachanov M. On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy. International Journal of Engineering Science. 2021;168:103567.

**DOI:** 10.1016/j.ijengsci.2021.103567

18. Khlybov AA, Kabaldin YuG, Ryabov DA, Anosov MS, Shatagin DA. Study of the damage to 12cr18ni10ti steel samples under low cycle fatigue using methods of nondestructive control. Industrial Laboratory. 2021;87(5):61-67. (In Russ.).

**DOI:** 10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67

19. Ababkov NV, Danilov VI, Smirnov AN, Popova NA, Pimonov MV. Study of dislocation structure, internal stresses and redistribution of carbon atoms in the zone of localized deformation in structural steel 20. Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya. 2024;21(1):112-121. (In Russ.).

**DOI:** 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.013

20. Britenkov AK, Rodyushkin VM, Ilyakhinski AV. Acoustic sensing study of the physical and mechanical properties of titanium alloy ti-6al-4v, made by selective laser melting. Materials physics and mechanics. 2021;47(1):139-158. (In Russ.).

**DOI:** 10.18720/MPM.4712021\_14

21. Murav'ev VV, Budrin AYu, Sintsov MA. Structuroscopy of Heat-Treated Steel Bars by the Speed of Propagation of Rayleigh Waves. Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2020;18(2):37-43. (In Russ.).

**DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43

22. Baev A, Asadchaya M, Mayorov A, Sergeeva O, Delenkovsky N. Possibilities of using of surface and subsurface waves' amplitude-angle characteristics for control of materials with surface-hardened inhomogeneous layer. Devices and Methods of Measurements. 2022;13(4):263-275.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-4-263-275

23. Murav'ev VV, Gushchina LV. Structuroscopy of Coils after High-Temperature Mechanical Treatment on the Basis of Measurements of Rayleigh Waves Velocity. Devices and Methods of Measurements. 2022;13(2):147-154. (In Russ.).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

24. Murav'ev VV, Murav'eva OV, Vagapov TR, Makarova VE, Stepanova EA. Acoustic and Electromagnetic Properties of Civilian Gun Blanks. Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2023;21(1):59-70. (In Russ.).

**DOI:** 10.22213/2410-9304-2023-1-59-70

25. Biot MA. Acoustics, elasticity, and thermodynamics of porous media: twenty-one papers. New York: Acoustical Society of America. 1992:265.

26. Knyaz'kov NN, Sharfarets BP. Acoustics of porous-elastic fluid saturated medium (an overview of the biot theory). Nauchnoe priborostroenie. 2016;26(1):77–84.

27. Kidner M, Hansen C. A compARison and review of theories of the acoustics of porous materials. International Journal of Acoustics and Vibrations. 2008;13:1-27.

28. Jimenez N, Umnova O, Groby J-P. Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials, and Porous

Media: From Fundamentals to Industrial Applications. Topics in Applied Physics. Springer. 2021:444.

**DOI:** 10.1007/978-3-030-84300-7

29. Omella AJ, Alvarez-Aramberri J, Strugaru M, et al. A simulation method for the computation of the effective P-wave velocity in heterogeneous rocks. Computational Mechanics. 2021;67:845-865.

**DOI:** 10.1007/s00466-020-01966-3

30. Ba A, Kovalenko A, Aristégui C, Mondain-Monval O, Brunet T. Thomas Brunet Soft porous silicone rubbers with ultra-low sound speeds in acoustic metamaterials. Scientific Reports. 2017;7:40106.

**DOI:** 10.1038/srep40106

31. Magliacano D, Ouisse M, Khelif A, Rosa SD, Franco F, Atalla N, Collet M. Computation of dispersion diagrams for periodic porous materials modeled as equivalent fluids. Mechanical Systems and Signal Processing. 2020;142:106749.

**DOI:** 10.1016/j.ymssp.2019.05.040

32. Dmitriev VL, Khusainov IG, Gimaltdinov IK. Propagation of Acoustic Waves in a Water-Saturated Porous Medium Formed by a Gas Hydrate. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021;94(6):1563-1570. **DOI:** 10.1007/s10891-021-02437-z

33. Sokolovskaya YG, Podymova NB, Karabutov AA. Using Broadband Acoustic Spectroscopy with a Laser Source of Ultrasound to Study the Frequency Dependences of the Phase Velocity of Longitudinal Acoustic Waves in Porous Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021;85(1):93-97.

**DOI:** 10.3103/S1062873821010251

34. Fedotovskii VS. Poristaya sreda kak akusticheskiy metamaterial s otritsatel'nymi inertsionnymi i uprugimi svoystvami. Acoustical Physics. 2018;64(5):547-553. (In Russ.). **DOI:** 10.1134/S0320791918050027

35. Bobrovnikskii YI. An acoustic metamaterial with unusual wave properties. Acoustical Physics. 2014;60(4):347. (In Russ.).

**DOI:** 10.7868/S0320791914040017

36. Sitdikova LF. Acoustic waves in porous media saturated with water with gas bubbles on the pore walls. Petroleum engineering. 2020;18(5):36-42. (In Russ.).

**DOI:** 10.17122/ngdelo-2020-5-36-42

37. Groby J-P, Huang W, Lardeau A, Auregan Y. The use of slow waves to design simple sound absorbing materials. Journal of Applied Physics. 2015;117(12).

**DOI:** 10.1063/1.4915115

38. Guo J, Chen C, Cai G, et al. Exploring Acoustic Wave Propagation and Equivalent Path in Quasi-Porous Medium of Loose Coal Mass. Natural Resources Research. 2024;33:389-403.

**DOI:** 10.1007/s11053-023-10297-y

39. Gubaidullin AA, Boldyreva OYu, Dudko DN. Velocity and attenuation of linear waves in porous media saturated with gas and its hydrate. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2022;63(4):599-605. (In Russ.). **DOI:** 10.1134/s002189442204006x

40. Sekoyan SS, Shlegel' VR, Batsanov SS [et al.]. Effect of the porosity and particle size of materials on sound-wave velocity. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2009;50(4):646-650. (In Russ.).

**DOI:** 10.1007/s10808-009-0086-y

41. Dai Z, Liu J, Geng H, et al. The influence of slip boundary effect on the propagation of shear horizontal guided waves in a fluid-saturated porous medium. Journal of Engineering Mathematics. 2024;144(15).

**DOI:** 10.1007/s10665-023-10318-y

42. Rose J.L. Ultrasonic guided waves in solid media. Cambridge; New York: Cambridge University Press. 2014:530.

43. Drachev KA, Rimlyand VI, Syasina TV. Measurement of sound velocity and damping coefficient in composite materials based on polymer binders with different degrees of reinforcement. Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2020;4(59):47-54.

44. Wilkinson SJ, Reynolds WN. The propagation of ultrasonic waves in carbon-fibre-reinforced plastics. Journal of Physics D: Applied Physics. 2002;7:50.

**DOI:** 10.1088/0022-3727/7/1/313

45. Brekhovskikh LM. Volny v sloistykh sredakh - 2-e izd. Dopolnennoe i pererabotannoe. M.: Nauka. 1973;340.

46. Karavayev DM, Khanov AM, Degtyarev AI, Makarova LE, Smirnov DV, Isaev OYu. Mechanical properties anisotropy of composite material based on thermoexpanded graphite. News of the samara centre of science of the Russian academy of sciences. 2012;14(4): 1243-1245.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-231-239

## Применение технологий искусственного интеллекта для оперативной диагностики механических характеристик чугуна

А.Ю. Кутепов<sup>1</sup>, А.П. Крень<sup>1</sup>, А.В. Никифоров<sup>2</sup>, Н.К. Турсунов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет,  
ул. Курчатова, 1, г. Минск 220064, Беларусь

<sup>3</sup>Ташкентский государственный транспортный университет,  
ул. Темиръулчиляр, 1, г. Ташкент 100167, Узбекистан

Поступила 30.07.2024

Принята к печати 10.09.2024

Кинетическое индентирование широко используется для измерения физико-механических свойств материалов, как один из наиболее универсальных методов неразрушающего контроля. В настоящей работе использованы новейшие достижения в области искусственного интеллекта и возможности библиотек языка программирования Питон, позволяющие на основании данных диаграммы микроударного нагружения материала провести точные измерения твёрдости чугунов различных марок. Показано, что применение машинного обучения позволяет устранить грубые ошибки и снизить погрешность косвенного определения твёрдости в несколько раз – до 10 единиц по Бринеллю НВ. Также установлено, что формирование дополнительных признаков для обучения моделей (на основании традиционно используемых характеристик: глубин внедрения, скорости перемещения индентора и контактных усилий в определённые моменты времени) положительным образом сказывается на точности измерений, однако при этом их количество также должно быть оптимизировано. Возможность эффективного использования машинного обучения для оценки твёрдости доказана путём сравнения расчётных значений твёрдости с данными, полученными стандартными методами испытаний. Достоинством разработанной методики контроля является то, что разработанные алгоритмы могут применяться для оперативной диагностики твёрдости чугуна с использованием уже существующего оборудования. Предложенный подход представляется целесообразным распространить на определение других механических характеристик чугуна: предела текучести, показателя деформационного упрочнения, ползучести, релаксации, определяемых методами индентирования.

**Ключевые слова:** индентирование, чугун, искусственный интеллект, машинное обучение, твёрдость

---

**Адрес для переписки:**

Крень А.П.  
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: 7623300@gmail.com

**Address for correspondence:**

Kren A.P.  
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail:7623300@gmail.com

---

**Для цитирования:**

А.Ю. Кутепов, А.П. Крень, А.В. Никифоров, Н.К. Турсунов.  
Применение технологий искусственного интеллекта для оперативной диагностики механических характеристик чугуна. Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 3. С. 231–239.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-231-239

**For citation:**

Kutsepau A, Kren A, Nikiforov A, Tursunov N.  
Application of Artificial Intelligence Technology for Prompt Diagnosis of Cast Iron Mechanical Properties. *Devices and Methods of Measurements*. 2024;15(3):231–239. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-231-239

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-231-239

# Application of Artificial Intelligence Technology for Prompt Diagnosis of Cast Iron Mechanical Properties

A. Kutsepau<sup>1</sup>, A. Kren<sup>1</sup>, A. Nikiforov<sup>2</sup>, N. Tursunov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

<sup>2</sup>*Belarussian State University,  
Kurchatov str., 1, Minsk 220064, Belarus*

<sup>3</sup>*Tashkent State Transport University,  
Temiryulchilar str., 1, Tashkent 100167, Yzbekistan*

Received 30.07.2024

Accepted for publication 10.09.2024

## Abstract

Kinetic indentation is widely used to measure physical and mechanical properties of materials as one of the most universal methods for non-destructive testing. This paper uses the latest advances in artificial intelligence and capabilities of the Python programming language libraries allowing to carry out accurate measurements of cast iron hardness based on the data of the material's micro-impact loading diagram. It has been shown that use of machine learning allows eliminating gross errors and reducing the error of indirect hardness evaluation in several times – down to 10 units according to Brinell HB. It has also been established that formation of additional features for training models (based on traditionally used characteristics: penetration depths, indenter movement speed and contact forces at certain points in time) has a positive effect on the accuracy of measurements, but amount of measurements should also be optimized. Feasibility of effective use of machine learning to evaluate hardness has been demonstrated by comparing of calculated hardness values with data obtained with standard testing methods. Advantage of the developed testing method is the fact that the developed algorithms can be used for prompt diagnostics of cast iron hardness using existing equipment. It is appropriate to extend the proposed approach for determination of other mechanical properties of cast iron: yield strength, strain hardening index, creep, relaxation, determined by indentation methods.

**Keywords:** indentation, cast iron, artificial intelligence, machine learning, hardness

---

### Адрес для переписки:

Крень А.П.

*Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: 7623300@gmail.com*

### Address for correspondence:

Kren A.P.

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: 7623300@gmail.com*

---

### Для цитирования:

А.Ю. Кутепов, А.П. Крень, А.В. Никифоров, Н.К. Турсунов.  
Применение технологий искусственного интеллекта  
для оперативной диагностики механических характеристик чугуна.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 231–239.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-231-239

### For citation:

Kutsepau A, Kren A, Nikiforov A, Tursunov N.  
Application of Artificial Intelligence Technology for Prompt Diagnosis  
of Cast Iron Mechanical Properties.  
*Devices and Methods of Measurements.*  
2024;15(3):231–239. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-231-239

## Введение

Чугун является одним из основных материалов, используемых в машиностроительном производстве. Его широкое применение обусловлено достаточно высокими механическими характеристиками при относительной простоте выплавки. Разработка новых техпроцессов и легирование привели к появлению высокопрочных чугунов с улучшенными характеристиками. Однако до настоящего времени существует проблема получения чугуна с заданными свойствам в такой степени, чтобы можно было предсказывать с полной уверенностью его структуру после плавки и термической обработки. При выплавке чугуна необходимо строгое соблюдение технических условий его производства, включая химический состав, распределение температуры по объёму отливки, время проведения той или иной операции и др. [1, 2]. Даже небольшие отклонения параметров от заданных в технических условиях в комплексе могут привести к выпуску партии отливок с негодной микроструктурой и физико-механическими свойствами. Это вызывает необходимость изготовления образцов-свидетелей при плавке и проведение исследований структуры и свойств полученного чугуна.

В подавляющем большинстве случаев на предприятиях контроль структуры чугуна осуществляется разрушающими методами, включая металлографию, испытания на разрыв, твёрдость и др. При высокой информативности эти методы трудоёмки и длительны. Применение неразрушающих методов, как правило, ограничивается магнитным и ультразвуковым методами, которые тоже обладают рядом ограничений.

Одним из наиболее перспективных, по нашему мнению, является метод динамического индентирования. В отличие от стандартных методов измерения твёрдости он не требует создания замкнутой силовой системы для вдавливания индентора и может применяться для контроля изделий сложной формы. Недостатком его является тот факт, что сведения о чугуне берутся с поверхностных слоев, однако для изделий, прошедших механическую обработку, этот недостаток нивелируется. В тоже время, как показывает практика, дина-

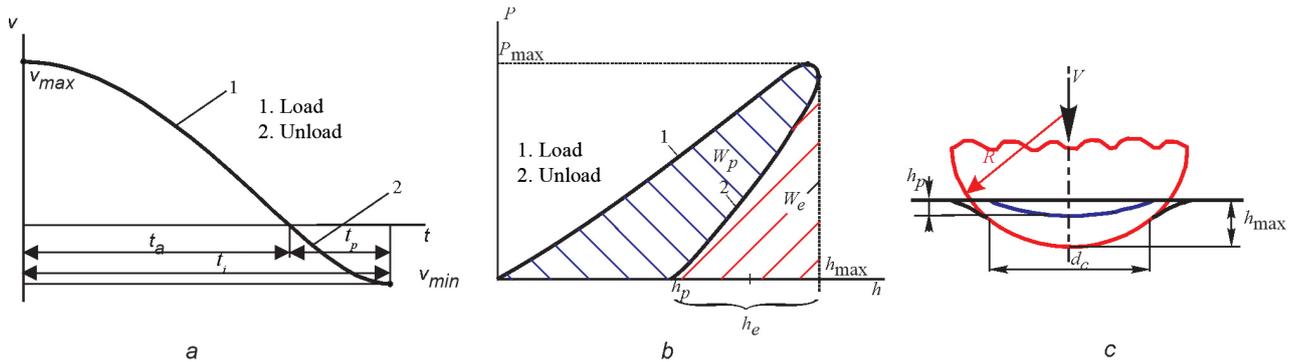
мические характеристики не всегда имеют устойчивую связь со статическими вследствие различия в достигаемых деформациях и скоростях деформации. Задача установления такой связи может успешно решаться с помощью инструментов искусственного интеллекта (ИИ) [3], которые широко используются в различных исследованиях для увеличения точности предсказания того или иного параметра материала [4, 5]. При этом широкое распространение получили такие средства для автоматизации процессов машинного обучения, как, например, библиотека PyCaret языка программирования Python, продукт Automated ML облачной платформы Azure и др., которые упрощают использование ИИ и расширяют области возможного применения [6].

Целью настоящей работы являлось изучение возможности контроля твёрдости по Бригеллю НВ чугуна методом ударного микроиндентирования с использованием диаграммы нагружения материала и обработки данных с помощью такого инструмента искусственного интеллекта как машинное обучение.

## Оборудование и материалы

В отличие от традиционного измерения твёрдости методом статического вдавливания индентора динамическое инструментальное индентирование подразумевает регистрацию всей диаграммы нагружения, когда индентор находится в контакте с испытуемым материалом (рисунок 1).

Эта диаграмма позволяет определить целый набор данных: значение максимального контактного усилия  $P_{\max}$ , глубину максимального  $h_{\max}$ , упругого  $h_e$  и пластического  $h_p$  внедрения, диаметр контактного отпечатка  $d_c$ , скорость подлёта  $V_{\max}$  и отскока индентора  $V_{\min}$ , время активного этапа удара  $t_a$ , коэффициент восстановления скорости  $e = V_{\min}/V_{\max}$ , энергию упругого  $W_e$  и пластического деформирования  $W_p$  [7]. Эти параметры позволяют рассчитать динамическую твёрдость  $H_d$  [8, 9], модуль упругости  $E$ , пластичность  $\delta$  и др. Однако, как показывают исследования, значение  $H_d$  плохо коррелирует со статической твёрдостью [10].



**Рисунок 1** – Характерные зависимости внедрения индентора в чугуны: *a* – изменение скорости в процессе ударного контакта; *b* – силовая диаграмма нагружения *c* – схема отпечатка

**Figure 1** – Characteristic dependencies of indenter's penetration in cast iron: *a* – velocity change during the impact contact; *b* – force-penetration diagram; *c* – imprint scheme

При наличии достаточно развитой теории определения динамических характеристик материалов связь между ними не всегда является очевидной. Для её установления необходим трудозатратный анализ, позволяющий определить степень взаимовлияния определяемых свойств и который мог бы повысить точность их измерения.

В настоящей работе данные для машинного обучения были получены с помощью прибора ИФМХ-Ч [11] с тремя датчиками, которые отличались между собой массой  $m$ , радиусом  $R$  и скоростью подлёта индентора  $V_{\max}$ , как представлено в таблице 1. Данный прибор позволяет определить динамическую твёрдость и указанные ранее параметры.

Таблица 1 / Table 1

### Параметры инденторов датчиков прибора ИФМХ-Ч

#### IFMH-CH sensors' indenter characteristics

Номер датчика	$m$ , г	$R$ , мм	$V_{\max}$ , м/с
Transducer number	$m$ , g	$R$ , mm	$V_{\max}$ , m/s
119	3.775	0.6	2.05
026T	3.889	1.0	1.66
007	3.805	0.9	1.88

Измерения проводились на 79 образцах чугуна, имеющего различную структуру: высокопрочном, сером, передельном,

с вермикулярным графитом. Параметры сигнала и характеристики (основные признаки, используемые в дальнейшем для машинного обучения) (таблица 2), полученные на каждом из образцов, усреднялись по десяти измерениям.

Таблица 2 / Table 2

### Основные признаки, использованные для обучения моделей

#### Main features used to train models

$P_{\max}$	Максимальное усилие / Maximum force
$h_{\max}$	Максимальная глубина внедрения / Maximum penetration depth
$h_p$	Глубина остаточного отпечатка (пластическая составляющая внедрения) / Plastic imprint
$h_e$	Упругая составляющая глубины вдавливания индентора / Elastic penetration depth
$d_c$	Диаметр контактного отпечатка / Contact diameter
$W_y$	Энергия упругого деформирования / Elastic energy
$E$	Модуль упругости / Elastic modulus
$H_d$	Динамическая твёрдость / Dynamic hardness
$V_{\min}$	Скорость отскока индентора / Rebound velocity
$t_a$	Время активного этапа удара / Time of active part of impact
$e$	Коэффициент восстановления скорости / Restitution coefficient
$\delta$	Пластичность / Plasticity

Значения статической твёрдости по Бринеллю, которая была искомым значением при обучении моделей, находились в диапазоне от 112 до 441 НВ и были измерены на статическом твердомере Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012-59 [12].

### Обработка данных и результаты

Для обучения моделей использовался язык программирования Python. При этом нами было изучена эффективность использования для обучения только основных признаков, представленных в таблице 2 (вариант 1), и обучения с использованием полиномиальных признаков, полученных из дополнительных признаков, формируемых путём различных математических операций, и основных (вариант 2). Для каждого датчика обучение

проводилось отдельно. Для всех вариантов автоматическая обработка данных, обучение, валидация и сравнение моделей производились с помощью библиотеки PyCaret. Из четырёх доступных модулей для установления целевого типа модели машинного обучения в PyCaret (классификация, регрессия, кластеризация и поиск аномалий) был использован модуль регрессии. Сравнение проводилось по таким метрикам, как: средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя квадратичная ошибка (MSE), корень средней квадратичной ошибки (RMSE), коэффициент детерминации ( $R^2$ ), среднеквадратическая логарифмическая ошибка (RMSLE), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) и время обучения (TT).

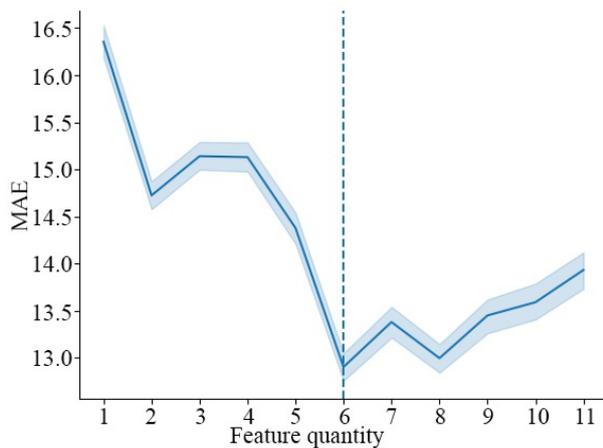
Результаты сравнения моделей при обучении только по основным признакам (вариант 1) представлены в таблице 3.

Таблица 3 /Table 3

### Сравнение метрик для различных моделей Metrics comparison of different models

Модель/ Model	MAE	MSE	RMSE	$R^2$	RMSLE	MAPE	TT, c/ TT, s
Linear Regression	13.3	318	17.5	0.938	0.078	0.059	1.83
Ridge Regression	14.0	337	18.2	0.932	0.083	0.065	0.03
Lasso Regression	14.3	346	18.5	0.931	0.090	0.068	0.04
Elastic Net	14.2	346	18.5	0.931	0.090	0.068	0.03
Lasso Least Angle Regression	14.1	344	18.4	0.930	0.084	0.066	0.03
Bayesian Ridge	14.9	401	19.9	0.921	0.089	0.068	0.03
Extra Trees Regressor	15.6	534	22.2	0.887	0.111	0.080	0.14
Random Forest Regressor	17.3	548	22.8	0.884	0.112	0.086	0.18
Gradient Boosting Regressor	16.7	568	23.4	0.881	0.113	0.081	0.10
AdaBoost Regressor	18.9	628	24.5	0.868	0.118	0.092	0.10
Extreme Gradient Boosting	19.1	765	27.5	0.838	0.134	0.094	0.08
Decision Tree Regressor	21.5	825	28.3	0.819	0.136	0.104	0.03
LGBBoosting Machine	46.5	3450	55.6	0.401	0.219	0.193	0.26

Как видно из таблицы 3, наиболее оптимальной моделью является линейная регрессия, обладающая наименьшими значениями  $MAE$ ,  $MSE$ ,  $RMSE$ ,  $RMSLE$ ,  $MAPE$  и наибольшим  $R^2$ . Выбранная модель прошла повторное обучение с 50 итерациями  $k$ -блочной кросс-валидации, определением оптимального количества признаков при ранжировании по важности с использованием модуля `SelectFromModel` библиотеки `Scikit-learn` и оптимизацией по  $MAE$ . Характеристики обученной модели представлены на рисунках 2 и 3. Из рисунка 2 видно, что оптимальным количеством признаков для обучения модели было 6. Этими признаками являлись  $P_{max}$ ,  $h_p$ ,  $d_c$ ,  $V_{min}$ ,  $\delta$ ,  $e$ .



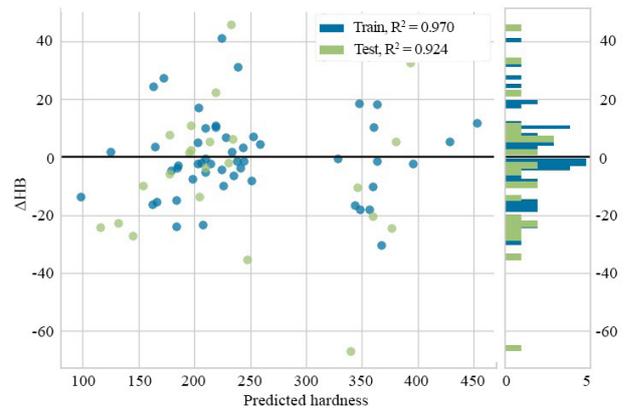
**Рисунок 2** – Выбор оптимальных параметров по зависимости средней абсолютной ошибки от количества признаков

**Figure 2** – Choose of optimal characteristics via mean absolute error dependency on the amount of features

Из рисунка 3 видно, что невязка – разница между измеренной и предсказанной моделью твёрдостью  $\Delta HB$  – не зависит от значения абсолютного значения  $HB$ . При этом для тестируемой модели значение  $R^2$  было равным 0,924, что меньше чем в таблице 3, поскольку использовалось меньшее количество итераций – 5.

С целью возможного улучшения точности модели были сконструированы дополнительные признаки (2-й вариант обучения), а также полиномиальные признаки 2-й степени, которые формировались из основных и дополнительных (3-й вариант). Признаки были получены при помощи модуля `PolynomialFeatures` библиотеки `sklearn.preprocessing`, дополнительно использовалась библиотека автоматической

генерации признаков `AutoFeat`. Дополнительные и полиномиальные признаки генерировались для полного набора исходных данных (таблица 2).



**Рисунок 3** – Разница между измеренным и предсказанным значением твёрдости  $\Delta HB$  для модели, использующей линейную регрессию

**Figure 3** – Difference between measured and predicted hardness  $\Delta HB$  for a linear regression model

На рисунке 4 представлена матрица корреляций между основными признаками (от  $P_{max}$  до  $e$ ), дополнительными признаками (от  $v_{min} \cdot \log(e)$  до  $1/h_p$ ) и целевым параметром –  $HB$ . Из рисунка 4 видно, что дополнительные признаки не обладают большей корреляцией с твёрдостью, чем основные. Кроме того, библиотекой `AutoFeat` были подобраны разные дополнительные признаки для разных датчиков: например, признак  $H_d^3 \cdot h_p^{1/2}$  обладал наибольшей корреляцией с  $HB$  среди дополнительных признаков для датчика 119, однако отсутствовал среди дополнительных признаков для двух других датчиков. Это означает, что общие новые признаки, которые можно было бы использовать для любого датчика, подключаемого к прибору ИФМХ-Ч не были обнаружены. Однако при создании дополнительных признаков для каждого отдельного датчика можно добиться некоторого улучшения точности модели.

При обучении моделей с полиномиальными признаками с помощью библиотеки `PyCaret` оптимальное количество признаков для обучения повысилось до 13 ( $P_{max}$ ,  $h_{max}$ ,  $h_p$ ,  $h_e$ ,  $d_c$ ,  $W_y$ ,  $H_d$ ,  $V_{min}$ ,  $t_a$ ,  $\delta$ ,  $e$ ,  $H_d^{1/2} \cdot h_{max}$ ,  $V_{min} \cdot \log(e)$ ), из которых далее формировались полиномиальные 2-й степени. На рисунке 5 представлен график зависимости предсказанного значения от истинного. Как можно заметить, моделям с полиномиальными

признаками не свойственны наличие выбросов, нелинейность в предсказании или сильное смещение.

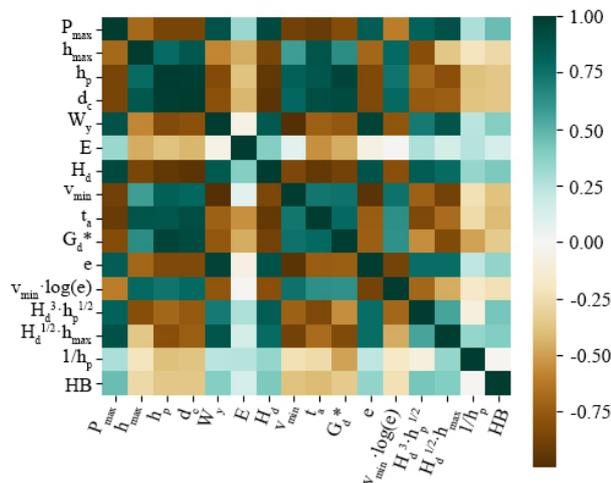


Рисунок 4 – Матрица корреляций признаков

Figure 4 – Feature correlation matrix

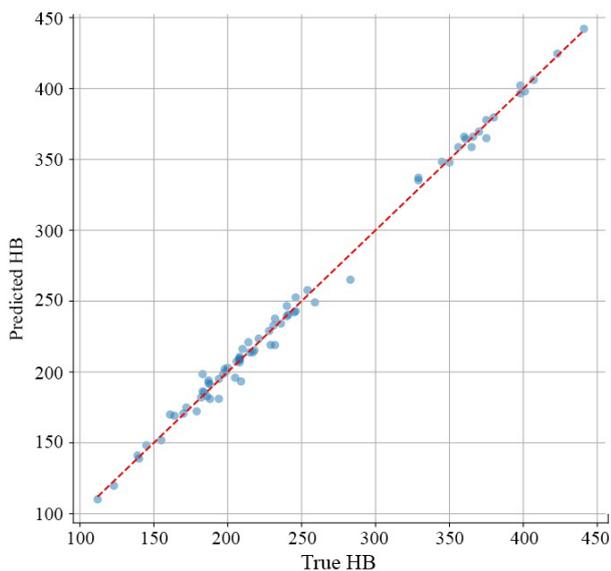
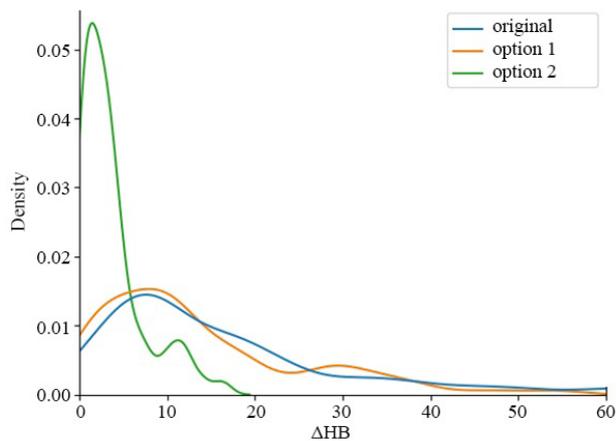


Рисунок 5 – Зависимость предсказанного значения  $HB$  от истинного для модели с полиномиальными признаками

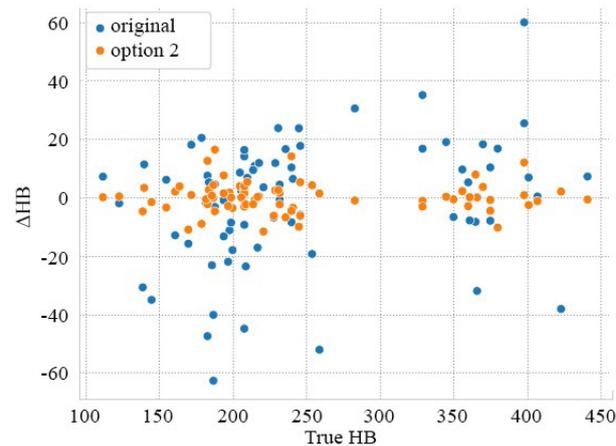
Figure 5 – Dependency plot of predicted  $HB$  value on true  $HB$  value for a regression model with polynomial features

После обучения были рассчитаны невязки оценки твёрдости и истинного значения твёрдости, измеренной прибором ИФМХ-Ч (используя алгоритм, изложенный в [11]); для модели, использующей основные признаки; и для модели с полиномиальными признаками.

Графики ядерной оценки плотности  $\Delta HB$  [13] и зависимости  $\Delta HB$  от истинного значения для датчика 026Т представлены на рисунке 6.



a



b

Рисунок 6 – Распределение погрешностей обученных моделей при использовании датчика 026Т: ядерная оценка плотности  $\Delta HB$  (a) и зависимость  $\Delta HB$  от истинного значения  $HB$  (b)

Figure 6 – Trained model's error distribution for 026T transducer: kernel distribution estimation of  $\Delta HB$  (a) and dependency of  $\Delta HB$  on the true  $HB$  value (b)

Из рисунка 6 видно, что мода распределения  $\Delta HB$  для модели с дополнительными и полиномиальными признаками (вариант 2) меньше, чем мода распределения  $\Delta HB$  прибора (исходная) и линейной модели (вариант 1) – 2,86 и 9,43 соответственно. Для линейной и полиномиальной моделей использован двухсторонний критерий Колмогорова–Смирнова ( $D$ - $P$ ) [14]. Рассчитанное значение величины  $D$  составило 0,42, а значение  $P$  – менее 0,0001.

Это говорит о том, что выборки, полученные при помощи данных моделей, являются статистически различными, причём стандартное отклонение выборки, полученной при помощи модели с полиномиальными признаками меньше, чем в случае линейной модели – 4,48 против 10,48, соответственно. Аналогичное наблюдается и для выборки, полученной при помощи прибора, стандартное отклонение которой равно 12,51.

Также на рисунке 7 показана погрешность измерения твёрдости.

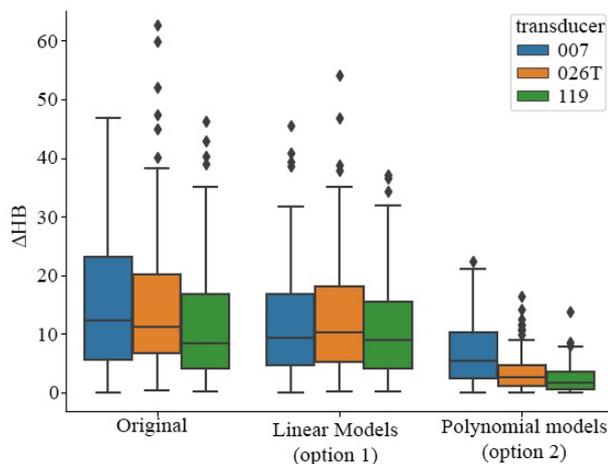


Рисунок 7 – Погрешности измерения твёрдости

Figure 7 – Hardness measurement error

Из рисунка (построенного для всех датчиков) видно, что значения  $\Delta HB$  обученных моделей (вариант 2) не превышает 25 НВ, в то время как  $\Delta HB$  для измерений, проведенных прибором ИФМХ-Ч, превышают 60 НВ.

## Заключение

Рассмотрено использование инструментов машинного обучения для прогнозирования значений статической твёрдости по Бринеллю по данным динамического индентирования. Показано, что применение стандартных библиотек языка программирования Python позволяет устранить грубые ошибки измерения и снизить погрешность косвенного определения твёрдости в 2 раза. При этом в большинстве случаев эта погрешность не превышает 10 НВ, что является недостижимым результатом при использовании обычных эмпирических зависимостей между динамической и статической твёрдостью. Также установлено, что формирование дополнительных признаков положительным образом

сказывается на точности измерений, однако при этом их количество также должно быть оптимизировано.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. Конкурс БРФФИ–МИРРУ 2023. Проект Т23УЗБ-035 «Изучение процессов структурообразования и локального деформирования чугунов с целью создания их улучшенных марок, методик и средств неразрушающего контроля физико-механических характеристик».

## Acknowledgments

The work was done with the support of Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research. Contest BRFFR-MIRRU 2023. Project T23УЗБ-035 «Study of structure forming processes and local deformation of cast iron aiming at creating their improved grades, methods and tools of non-destructive testing of their physical and mechanical properties».

## Список использованных источников / References

1. Roy E. Cast iron technology. Butterworth-Heinemann. 2014;252 p.  
DOI: 10.1016/B978-0-408-01512-7.50001-X
2. Ferro P. Cast Irons: Properties and Applications. Mdpi AG. 2020;150 p.
3. Bharadiya JP, Reji TK, Farhan A. Rise of Artificial Intelligence in Business and Industry. Journal of Engineering Research and Reports. 2023;3(25):85-103.  
DOI: <https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i3893>
4. Shahhosseini M. [et al.]. Coupling machine learning and crop modeling improves crop yield prediction in the US Corn Belt. Sci Rep. 2021;(11):1606 p.  
DOI: 10.1038/s41598-020-80820-1
5. Xin D. [et al.]. Whither AutoML? Understanding the Role of Automation in Machine Learning Workflows. In Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21). 2021;(83):1-16.  
DOI: 10.1145/3411764.3445306
6. Lu J, Suresh S. Dynamic indentation for determining the strain rate sensitivity of metals. Mech Phys Solid. 2003;(51):11-12.  
DOI: 10.1016/j.jmps.2003.09.007

7. Hassani M. [et al.]. Material hardness at strain rates beyond 106 s<sup>-1</sup> via high velocity microparticle impact indentation. *Scripta Mater.* 2020;(177):198-202.

**DOI:** 10.1016/j.scriptamat.2019.10.032

8. Kren A, Delendik M, Machikhin A. Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation. *International Journal of Impact Engineering.* 2022;(162):104141

**DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2021.104141

9. Hackett BL. [et al.]. Advances in the measurement of hardness at high strain rates by nanoindentation. *J Mater Res.* 2023;5(38):1163-77.

**DOI:** 10.1557/s43578-023-00921-1

10. Крень А.П. Контроль физико-механических характеристик чугуна прибором ифмх-ч / А.П. Крень [и др.] // *Литьё и металлургия.* – 2019. – № 3.

10. Kren AP. [et al.]. Testing physical and mechanical properties of cast iron using ifmh-ch device. *Casting and metallurgy.* 2019;(3). (In Russ.).

11. Organek P, Gosowski B, Redecki M. Relationship between Brinell hardness and the strength of structural steels. *Structures.* 2024;59:105701.

**DOI:** 10.1016/j.istruc.2023.105701

12. Антонов А.В. Построение непараметрической плотности распределения на основании цензурированной информации / А.В. Антонов, В.А. Чепурко // *Надёжность.* – М.: Издательский дом «Технология». – 2005. – № 2. – С. 3.

12. Antonov AV, Chepurko VA. Building non-parametric distribution density using censored information. *Reliability.* 2005;(2):3 p. (In Russ.).

13. Hoffman J. *Categorical and Cross-Classified Data: McNemar's and Bowker's Tests, Kolmogorov-Smirnov Tests, Concordance. Basic Biostatistics for Medical and Biomedical Practitioners (Second Edition).* 2019:233-247 pp.

**DOI:** 10.1016/B978-0-12-817084-7.00015-2

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-240-247

# Магнитный круговой дихроизм оксидных плёнок: изучение электронных, магнитных и зарядовых состояний

Ю.Э. Самошкина<sup>1</sup>, А.В. Черниченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики имени Л.В. Киренского, Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”,  
Академгородок 50, стр. 38, г. Красноярск 660036, Россия

<sup>2</sup>Московский технический университет связи и информатики,  
ул. Авиамоторная, 8а, г. Москва 111024, Россия

Поступила 04.02.2024

Принята к печати 09.09.2024

Полупроводниковые материалы на основе оксидов ZnO и RE<sup>3+</sup>MnO<sub>3</sub> рассматриваются как потенциальные кандидаты для спинтроники. В работе представлены методика и результаты исследования эффекта магнитного кругового дихроизма для плёночных структур Zn<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O, Zn<sub>1-x-y</sub>Co<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>O и RE<sub>1-x</sub>A<sub>x</sub><sup>3+</sup>MnO<sub>3</sub> в диапазоне видимого излучения. Показано, что поведение магнитного кругового дихроизма плёнок манганита отражает не только магнитную, но и зарядовую составляющую материала. Это указывает на возможность исследования магнитных и транспортных характеристик плёнок с помощью магнитного кругового дихроизма спектроскопии. Поскольку магнитный круговой дихроизм также напрямую зондирует основные и возбуждённые электронные состояния плёнки, были получены данные, обновляющие расчётные параметры для описания зонной структуры манганитов. В случае плёнок Zn<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O и Zn<sub>1-x-y</sub>Co<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>O установлено, что спектральная форма магнитного кругового дихроизма выступает в качестве инструмента для обнаружения наночастиц Co в матрице твёрдого раствора ZnO:Co и ZnO:(Co+Al).

**Ключевые слова:** магнито-оптическая спектроскопия, тонкие оксидные плёнки, наночастицы, зарядовая и магнитная подсистемы, электронные состояния

---

**Адрес для переписки:**

Самошкина Ю.Э.  
Институт физики имени Л.В. Киренского  
Сибирского отделения РАН,  
Академгородок 50, стр. 38, г. Красноярск 660036, Россия  
e-mail: uliag@iph.krasn.ru

**Address for correspondence:**

Samoshkina Yu.  
Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of Russian Academy  
of Sciences  
Akademgorogok 50, bld. 38, Krasnoyarsk 660036, Russia  
e-mail: uliag@iph.krasn.ru

---

**Для цитирования:**

Ю.Э. Самошкина, А.В. Черниченко.  
Магнитный круговой дихроизм оксидных плёнок: изучение  
электронных, магнитных и зарядовых состояний.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 240–247.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-240-247

**For citation:**

Samoshkina Yu, Chernichenko A.  
Magnetic Circular Dichroism of Oxide Films: Study of Electronic,  
Magnetic and Charge States.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):240–247. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-240-247

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-240-247

# Magnetic Circular Dichroism of Oxide Films: Study of Electronic, Magnetic and Charge States

Yu. Samoshkina<sup>1</sup>, A. Chernichenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Akademgorogok 50, bld. 38, Krasnoyarsk 660036, Russia

<sup>2</sup>Moscow Technical University of Communication and Informatics, Aviamotornaya str., 8a, Moscow 111024, Russia

Received 04.02.2024

Accepted for publication 09.09.2024

## Abstract

Semiconductor materials based on ZnO and RE<sup>3+</sup>MnO<sub>3</sub> oxides are considered as potential candidates for spintronics. This article presents the methodology and results of studying the effect of magnetic circular dichroism for Zn<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O, Zn<sub>1-x-y</sub>Co<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>O and RE<sub>1-x</sub>A<sub>x</sub><sup>3+</sup>MnO<sub>3</sub> film structures in the visible radiation range. It has been shown that the magnetic circular dichroism behavior of the manganite films reflects not only the magnetic, but also the charge component of the material. This indicates the possibility of studying the magnetic and transport characteristics of the films using the magnetic circular dichroism spectroscopy. Since the magnetic circular dichroism effect also directly probes the ground and excited electronic states

of the film, it has been obtained data that update calculated parameters for describing the manganites band structure. In the case of the Zn<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O and Zn<sub>1-x-y</sub>Co<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>O films, the magnetic circular dichroism spectroscopy acts as a tool for detecting Co nanoparticles in the solid solution matrix of ZnO:Co and ZnO:(Co+Al).

**Keywords:** magneto-optical spectroscopy, thin oxide films, nanoparticles, charge and magnetic subsystems, electronic states

---

### Адрес для переписки:

Самошкина Ю.Э.  
Институт физики имени Л.В. Киренского  
Сибирского отделения РАН,  
Академгородок 50, стр. 38, г. Красноярск 660036, Россия  
e-mail: uliag@iph.krasn.ru

### Address for correspondence:

Samoshkina Yu.  
Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of Russian Academy  
of Sciences  
Akademgorogok 50, bld. 38, Krasnoyarsk 660036, Russia  
e-mail: uliag@iph.krasn.ru

---

### Для цитирования:

Ю.Э. Самошкина, А.В. Черниченко.  
Магнитный круговой дихроизм оксидных плёнок: изучение  
электронных, магнитных и зарядовых состояний.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 240–247.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-240-247

### For citation:

Samoshkina Yu, Chernichenko A.  
Magnetic Circular Dichroism of Oxide Films: Study of Electronic,  
Magnetic and Charge States.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):240–247. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-240-247

## Введение

Поиск и исследование новых магнитных полупроводниковых материалов, проявляющих высокую спиновую поляризацию носителей при высоких температурах, является актуальной научно-технической задачей. В этом направлении плёнки  $Zn_{1-x}Co_xO$ ,  $Zn_{1-x-y}Co_xAl_yO$  и  $RE_{1-x}^{3+}A_x^{2+}MnO_3$  ( $RE$  – редкоземельный элемент,  $A$  – щёлочноземельный металл) рассматриваются как потенциальные кандидаты для спинтронных устройств [1, 2]. В данных материалах зарядовая и магнитная подсистемы являются существенно связанными, поэтому образцы демонстрируют уникальные и практически значимые свойства, такие как ферромагнетизм при комнатной температуре [3], колоссальное магнитосопротивление [4] и магнитокалорический эффект [5]. При этом неясен характер связи между зарядовыми и магнитными состояниями, определяющими макроскопические свойства манганитов. Картина электронных состояний материалов вида  $RE_{1-x}^{3+}A_x^{2+}MnO_3$  до конца не установлена.

Теоретическое исследование электронной структуры магнитного материала базируется на его оптических или магнитооптических свойствах [6, 7]. При этом магнитооптические данные являются более информативными. Однако расчёт электронной структуры плёнок на основе спектральной зависимости магнитооптического эффекта Керра (ЭК) также имеет свои недостатки, поскольку ЭК критически зависит от качества поверхности образцов. Поэтому данные об электронных состояниях манганита, полученные в отражённом свете с помощью ЭК ранее, не имеют целостности. Поскольку керровское вращение описывается сложной функцией диагональной и недиагональной компонент тензора диэлектрической проницаемости, наблюдались существенные изменения формы ЭК спектра в зависимости от толщины плёнок [8, 9], концентрации  $A$ -элемента [7] и типа эпитаксиальной деформации материала [10].

В случае материалов  $Zn_{1-x}Co_xO$  и  $Zn_{1-x-y}Co_xAl_yO$ , в которых кобальт представляет собой твёрдый раствор в решётке  $ZnO$  (далее  $ZnO:Co$  и  $ZnO:(Co+Al)$ , соответственно), природа магнетизма до сих пор остаётся дискуссионной [3, 11].

Поскольку магнитооптический эффект магнитного кругового дихроизма (МКД) напрямую зондирует различные магнитные вклады в материале, а также его основные и возбуждённые электронные состояния, изучение оксидных плёнок с помощью МКД спектроскопии является чрезвычайно информативным. Следует отметить, что спектральной зависимости эффекта уделяется недостаточно внимания, тогда как именно она отражает обменные и спин-орбитальные взаимодействия в материале. Данный эффект часто используется для исследования магнитных свойств плёнок [12], поскольку МКД линейен по намагниченности и отражает форму её полевой или температурной зависимости, исключая вклад немагнитной составляющей. В настоящей работы основное внимание уделено именно спектральной зависимости МКД плёнок.

## Образцы и метод исследования

В качестве плёночных образцов манганита толщиной от 20 до 150 нм исследованы поликристаллические образцы  $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ ,  $Pr_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$  и  $Pr_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$  (LSMO и PSMO, соответственно), осаждённые на подложку  $ZrO_2\cdot Y_2O_3$ ; а также монокристаллическая плёнка  $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$  (LCMO) толщиной 50 нм, выращенная на кристалле  $LaAlO_3$ . Поликристаллические плёнки получены методом реактивного высокочастотного магнетронного распыления на постоянном токе [13]. Эпитаксиальная плёнка выращена путём химического осаждения металлоорганических соединений из паровой фазы [14]. После осаждения плёнку LCMO/LAO отжигали в течение часа в атмосфере кислорода при температуре 800 °С. Поликристаллические плёнки  $Zn_{0.78}Co_{0.22}O$  и  $Zn_{0.75}Co_{0.18}Al_{0.7}O$  были выращены на стеклянной подложке с помощью стандартной системы радиочастотного магнетронного распыления [15].

Магнитный круговой дихроизм описывается как часть комплексной величины эффекта Фарадея (ЭФ) [16]. В этом случае линейно поляризованная волна рассматривается как суперпозиция двух идентичных круговых волн с разной поляризацией: по левому и правому кругу. При прохождении такой волны через оптически активную намагниченную среду

вдоль направления магнитного поля фазовые скорости и амплитуда право-поляризованной и лево-поляризованной волн отличны друг от друга. Разница в фазовой скорости волн напрямую связана с разностью их показателей преломления ( $\Delta n$ ). Разница в амплитуде описывает разницу в показателях поглощения ( $\Delta k$ ) указанных волн. Таким образом, ЭФ описывается разностью показателей преломления двух волн с круговой поляризацией и представляет собой поворот плоскости поляризации падающей волны. Разница в показателях поглощения двух волн с круговой поляризацией вызывает эллиптичность падающей волны и представляет собой МКД. Комплексная величина ЭФ в общем виде описывается выражением (1) [16]:

$$\tilde{\alpha}_F \sim (\Delta n - i\Delta k). \quad (1)$$

Феноменологически форма МКД спектра повторяет спектральную зависимость действительной части недиагональной компоненты тензора диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{xy}$ ), непосредственно отражающей внутреннюю природу материала. МКД эффект описывается выражением:

$$\theta \sim \frac{n\epsilon''_{xy} - k\epsilon'_{xy}}{n^2 + k^2}, \quad (2)$$

где  $\epsilon'_{xy}$  и  $\epsilon''_{xy}$  – реальная и мнимая части  $\epsilon_{xy}$ , соответственно.

Из выражения (2) хорошо видно, что  $\theta \sim \epsilon'_{xy}$  при условии  $n \ll k$  [16].

Эффект МКД измерялся на оригинальной автоматизированной установке, созданной на базе монохроматора МДР-12, а также фотоэлектронного умножителя Hamamatsu E678-11C. В эксперименте использована модуляция состояния поляризации световой волны. В качестве модулятора выступала призма из плавленого кварца с приклеенным к ней пьезоэлектрическим керамическим элементом. Когда на пьезоэлемент подавалось переменное напряжение частотой  $\omega$ , соответствующей собственной частоте системы, в кварцевой призме возбуждалась упругая стоячая волна. Круговая поляризация световой волны была сгенерирована на выходе из кварцевой призмы за счёт падения на неё линейно-поляризованной волны с углом  $45^\circ$  между плоскостью поляризации и горизонтальной осью призмы. В случае МКД оптическая плотность ( $D$ ) для световых волн

правой ( $D^+$ ) и левой ( $D^-$ ) круговой поляризации различна. При измерении магнитный вектор и световой луч были направлены нормально плоскости плёнок. Таким образом, величина эффекта ( $\theta$ ) измерялась как разность  $D^+ - D^-$  для двух противоположных направлений приложенного магнитного поля (рисунок 1). Спектральные зависимости эффекта в диапазоне 1,1–4,5 эВ были измерены при температуре от 77 до 300 К в приложенном магнитном поле 800 кА/м. Точность измерений величины эффекта составляла  $10^{-4}$ , а спектральное разрешение 0,02 эВ в зависимости от длины волн.

## Результаты и обсуждение

Спектры МКД для плёнок  $\text{Zn}_{0.78}\text{Co}_{0.22}\text{O}$  и  $\text{Zn}_{0.75}\text{Co}_{0.18}\text{Al}_{0.7}\text{O}$  показаны на рисунке 2а.

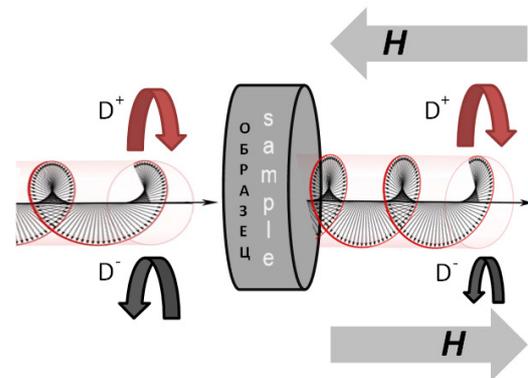


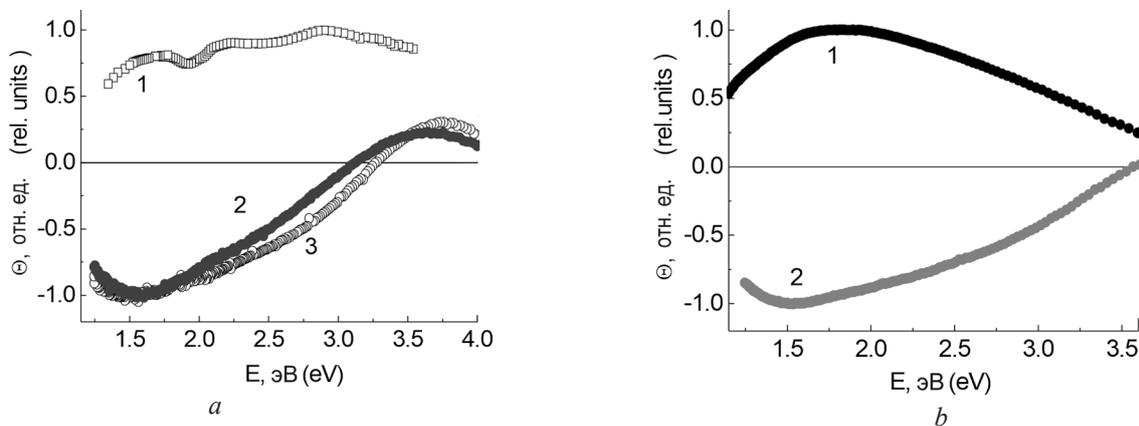
Рисунок 1 – Схематическое изображение природы эффекта магнитного кругового дихроизма и принцип его измерения

Figure 1 – Schematic representation of the nature of the magnetic circular dichroism effect and the principle of its measurement

Видно, что формы спектров практически совпадают, что говорит о единой картине основных и возбуждённых электронных состояний образцов. Спектры характеризуются двумя максимума противоположных знаков: широкий минимум в области 1,3–3,2 эВ и максимум при 3,8 эВ. Спектры МКД исследуемых плёнок сопоставлялись со спектрами МКД плёнок  $\text{ZnO:Co}$ , не содержащих вторичных фаз и проявляющих ферромагнитное поведение при комнатной температуре [3, 11]. В отличие от плёнок  $\text{Zn}_{0.78}\text{Co}_{0.22}\text{O}$  и  $\text{Zn}_{0.75}\text{Co}_{0.18}\text{Al}_{0.7}\text{O}$  образцы  $\text{ZnO:Co}$  характеризуются положительным сигналом МКД в области 1,5–3,5 эВ

(кривая 1 на рисунке 2а). Дополнительно были исследованы спектральные зависимости МКД для сплошной плёнки Co и металлических наночастиц Co, диспергированных внутри матрицы SiO<sub>2</sub> (рисунке 2б). Как и в случае ферромагнитной плёнки ZnO:Co, сплошная плёнка Co характеризуется положитель-

ным сигналом МКД в области 1,1–3,5 эВ, демонстрирующим широкий асимметричный максимум с центром тяжести при 1,8 эВ (кривая 1 на рисунке 2б). При этом спектр МКД для наночастиц Co описывается экстремумом в области 1,3–3,5 эВ (кривая 2 на рисунке 2б).



**Рисунок 2** – Спектральные зависимости магнитного кругового дихроизма при комнатной температуре и  $H = 800$  кА/м: *a* – плёнка ZnO:Co без содержания вторичных фаз (кривая 1) и плёнки Zn<sub>0,75</sub>Co<sub>0,18</sub>Al<sub>0,7</sub>O и Zn<sub>0,78</sub>Co<sub>0,22</sub>O с относительным содержанием металлического кобальта (кривые 2 и 3, соответственно); *b* – плёнка Co толщиной 30 нм (кривая 1) и наночастицы Co в матрице SiO<sub>2</sub> со средним размером частиц в диаметре  $D = 7,7$  нм (кривая 2)

**Figure 2** – Spectral dependences of magnetic circular dichroism at room temperature and  $H = 800$  кА/м: *a* – ZnO:Co film without the content of secondary phases (curve 1) and Zn<sub>0,75</sub>Co<sub>0,18</sub>Al<sub>0,7</sub>O and Zn<sub>0,78</sub>Co<sub>0,22</sub>O films with a relative content of metallic cobalt (curves 2 and 3, respectively); *b* – Co film 30 nm thick (curve 1) and Co nanoparticles in a SiO<sub>2</sub> matrix with an average particle size in diameter  $D = 7.7$  nm (curve 2)

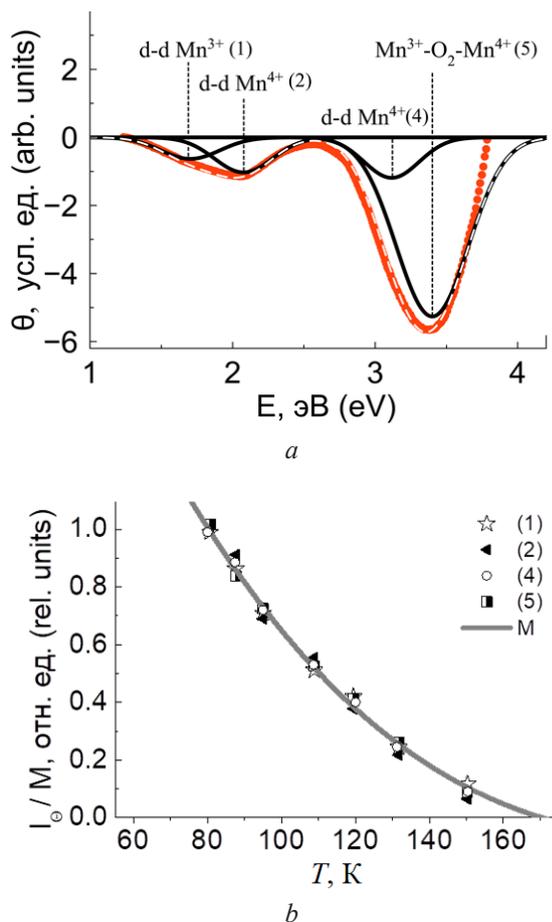
Таким образом установлено, что форма спектра МКД зависит от состояния, в котором находится кобальт: в виде твёрдого раствора в решётке ZnO, в виде металлической плёнки, в виде металлических наночастиц. Хорошее согласие между спектрами МКД в области 1,3–3,2 эВ, наблюдаемое для образцов Zn<sub>0,78</sub>Co<sub>0,22</sub>O и Zn<sub>0,75</sub>Co<sub>0,18</sub>Al<sub>0,7</sub>O, а также для наночастиц Co, свидетельствует о наличии вторичной фазы в исследуемых плёнках. В этом случае, высокоэнергетический максимум при 3,8 эВ следует отнести к поляризованному состоянию носителей заряда в матрице твёрдого раствора ZnO:Co и ZnO:(Co+Al). Обработка и анализ данных для плёнок ZnO:Co подробно изложен в работе [17]. Температура блокировки ( $T_b$ ) обнаруженных наночастиц Co, а также их средний размер в диаметре ( $\langle D \rangle$ ) исследованы в работе [18]. Величина  $\langle D \rangle$  оценивалась по формуле Бина–Ливингстона:

$$T_b = K_{eff}(4\pi r^3/3)/25k_B,$$

где  $K_{eff}$  – энергия эффективной магнитокристаллической анизотропии ( $4,3 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>);

$k_B$  – постоянная Больцмана;  $r$  – радиус частицы. Для Zn<sub>0,78</sub>Co<sub>0,22</sub>O  $T_b = 40$  К и  $\langle D \rangle = 3,9$  нм, для Zn<sub>0,75</sub>Co<sub>0,18</sub>Al<sub>0,7</sub>O – 90 К и 5,2 нм, соответственно. Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на спектральное поведение МКД различных материалов, содержащих кобальт. Так, например, спектры МКД для поликристаллических образцов Co-P толщиной  $\approx 3$ –7 нм [19] указывают на наличие наночастиц Co в приповерхностном слое стеклянной подложки.

Исходя из температурной зависимости электрического сопротивления плёнок манганита, определена точка перехода полупроводник-диэлектрик  $T_{ПД}$  [12, 13]. Отмечено, что значение  $T_{ПД}$  зависит от толщины поликристаллических плёнок PSMO ( $x = 0,4$ ) и лежит в интервале 155–200 К [12]. Для эпитаксиальной LСМО плёнки  $T_{ПД} \approx 265$  К [13]. Плёнки PSMO ( $x = 0,2$ ) продемонстрировали диэлектрическое поведение во всём исследуемом температурном интервале [12]. Пример спектральной зависимости МКД диэлектрической и полупроводниковой плёнки манганита, представлен на рисунке 3а и рисунке 4а, соответственно.

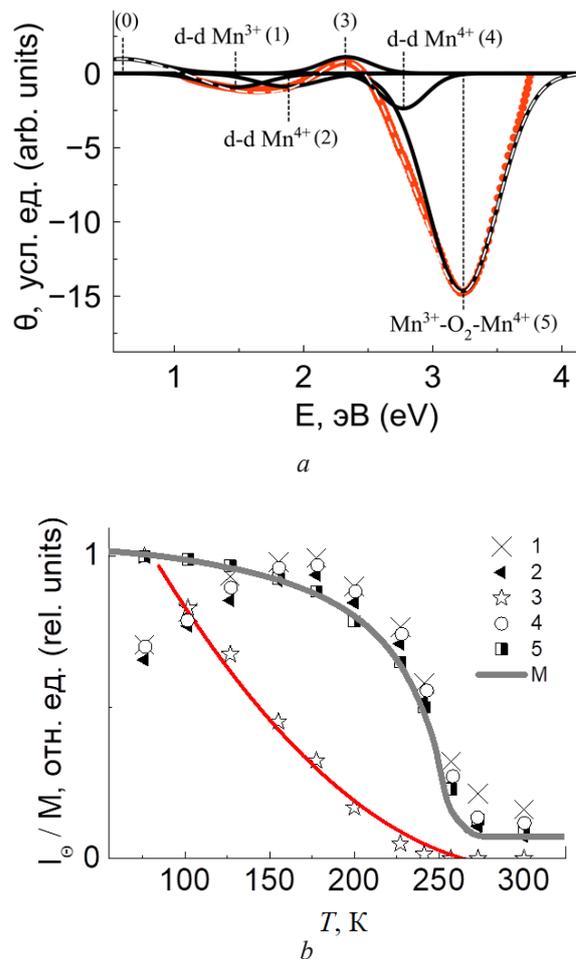


**Рисунок 3** – Диэлектрическая плёнка манганита: *a* – схема разложения спектра магнитного кругового дихроизма на линии формы Гаусса, штриховая линия – суперпозиция линий разложения, совпадающая с экспериментальным спектром; *b* – температурные зависимости интенсивности линий разложения ( $I_0$ ) в сравнении с температурным ходом намагниченности ( $M$ ) образца во внешнем магнитном поле ( $H=400$  кА/м), направленном нормально плоскости плёнки

**Figure 3** – Manganite film in insulating state: *a* – decomposition scheme of magnetic circular dichroism spectrum into Gaussian lines, the dashed line is a superposition of decomposition lines, coinciding with the experimental spectrum; *b* – temperature dependences of the intensity of the decomposition lines ( $I_0$ ) in comparison with the temperature variation of the sample magnetization ( $M$ ) in an external magnetic field ( $H=400$  kA/m) directed normally to the film plane

В спектрах наблюдается асимметрия основных максимумов, что говорит о наложении нескольких резонансов. Спектры МКД для плёнок всех типов проводимости были аппроксимированы минимальным количеством линий формы Гаусса. Амплитуда линии, положение и ширина линии на половине высоты являлись

параметрами подгонки. На рисунках хорошо видно, что спектр МКД диэлектрической плёнки описывается четырьмя спектральными линиями (линии (1), (2), (4) и (5) на рисунке 3а), в то время как для полупроводникового образца характерны пять составляющих компонент в видимом диапазоне спектра (линии (1)–(5) на рисунке 4а).



**Рисунок 4** – Полупроводниковая плёнка манганита: *a* – схема разложения магнитного кругового дихроизма на линии формы Гаусса, штриховая линия – суперпозиция линий разложения, совпадающая с экспериментальным спектром; *b* – температурные зависимости интенсивности линий разложения ( $I_0$ ) в сравнении с температурным ходом намагниченности ( $M$ ) образца во внешнем магнитном поле ( $H=400$  кА/м), направленном нормально плоскости плёнки

**Figure 4** – Manganite film in a conductive state: *a* – decomposition scheme of magnetic circular dichroism spectrum into Gaussian lines, the dashed line is a superposition of decomposition lines that coincides with the experimental spectrum; *b* – temperature dependences of the intensity of the decomposition lines ( $I_0$ ) in comparison with the temperature variation of the sample magnetization ( $M$ ) in an external magnetic field ( $H=400$  kA/m) directed normally to the film plane

Для качественного спектрального анализа был прослежен температурный ход интенсивности указанных линий (1)–(5) в сравнении с температурным поведением намагниченности плёнок. В случае диэлектрических образцов наблюдается классический случай, когда температурные кривые намагниченности и интенсивности линий совпадают (рисунок 3*b*). Для полупроводникового образца наблюдается нетипичное магнитооптическое поведение, когда только интенсивность линии (5) следует за намагниченностью во всём исследуемом интервале температур (рисунок 4*b*). Интенсивность линий (1), (2) и (4) с понижением температуры растёт до некоторой точки, следуя за намагниченностью образца, а далее изменяет своё направление. Такое изменение хода объясняется перераспределением спектральной интенсивности между возбуждениями различной природы в области 0–2 эВ, типичное для полупроводниковых образцов [23–25]. Следовательно, в области ниже 1 эВ предполагается наличие ещё одного максимума (линия (0) на рисунке 4*a*). Для линии (3) характерен рост интенсивности с понижением температуры, однако её температурный ход отличается от хода намагниченности. Такая картина ещё раз подтверждает, что линия (3) не связана с магнитной подрешёткой материала.

## Заключение

Установлено, что эффект магнитного кругового дихроизма, в частности его спектральная форма, является качественным инструментом для обнаружения наночастиц Co в плёночных структурах

$Zn_{1-x}Co_xO$  и  $Zn_{1-x-y}Co_xAl_yO$ , а также представляет хорошую альтернативу высокоточной спектроскопии рентгеновского поглощения при синхротронном излучении. Такая методика исследования может быть также применена к другим составам разбавленных полупроводниковых оксидов. В случае замещённых манганитов спектроскопия магнитного кругового дихроизма показала себя качественным инструментом для изучения электронных, магнитных и зарядовых состояний в плёнках вида  $RE_{1-x}^{3+}A_x^{2+}MnO_3$ .

Впервые обнаружен магнитооптический сигнал в видимом диапазоне спектра,

отражающий изменение в зонной структуре манганита. Следовательно, температуры фазовых переходов «металл–изолятор» и «ферромагнетик–парамагнетик» для манганита могут быть определены, исходя из температурного хода интенсивности спектральных линий магнитного кругового дихроизма.

Установлено, что электронная структура плёнок манганита не зависит от толщины, состава и типа подложки. Ключевую роль играет лишь проводимость материала. Полученные данные обновляют основу для теоретического описания зонной структуры манганитов в целом.

## Благодарности

Работа выполнена в рамках научной тематики государственного задания Института физики Сибирского отделения Российской академии наук.

## Acknowledgments

The work was carried out within the state assignment of Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

## References

1. Hirohata A, Yamada K, Nakatani Yo, Prejbeanu I-L, Diény B, Pirro Ph, Hillebrands B. Review on spintronics: Principles and device applications. *J. Mag. Mag. Mater.* 2020;509:166711. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166711
2. Haghiri-Gosnet A-M, Renard J-P. CMR manganites: physics, thin films and devices. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2003;36:R127-R150. DOI: 10.1088/0022-3727/36/8/201
3. Ying M, Blythe HJ, Dizayee W, Heald SM, Gerriou FM, Fox AM, and Gehring GA. Advantageous use of metallic cobalt in the target for pulsed laser deposition of cobalt-doped ZnO films. *Appl. Phys. Lett.* 2016;109:072403. DOI: 10.1063/1.4961223
4. Ramirez AP. Colossal magnetoresistance. *J. Phys. Condens. Matter.* 1997;9:8171-8199. DOI: 10.1088/0953-8984/9/39/005
5. Salazar-Muñoz VE, Lobo Guerrero A, Palomares-Sánchez SA. Review of magnetocaloric properties in lanthanum manganites. *J. Magn. Magn. Mater.* 2022;562:169787. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169787
6. Jung JH, Kim KH, Eom DJ, Noh TW, Cho EJ, Yu Jaejun, Kwon YS, Chung Y. Determination of

- electronic band structures of  $\text{CaMnO}_3$  and  $\text{LaMnO}_3$  using optical-conductivity analyses. *Phys. Rev. B.* 1997;55:15489. DOI: 10.1103/physrevb.55.15489
7. Yamaguchi S, Okimoto Y, Ishibashi K, Tokura Y. Magneto-optical Kerr effects in perovskite-type transition-metal oxides:  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  and  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ . *Phys. Rev. B.* 1998;58(11):6862-6870. DOI: 10.1103/PhysRevB.58.6862
8. Liu HL, Lu KS, Kuo MX, Uba L, Uba S, Wang LM, Jeng H-T. Magneto-optical properties of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  thin films with perpendicular magnetic anisotropy. *J. Appl. Phys.* 2006;99:043908. DOI: 10.1063/1.2173681
9. Veis M, Visnovský S, Lecoeur Ph, Haghiri-Gosnet A-M, Renard J-P, Beauvillain P, Prellier W, Mercey B, Mistrik J, Yamaguchi T. Magneto-optic spectroscopy of  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$  films on  $\text{SrTiO}_3$  (100) and (110) substrates. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2009;42:195002. DOI: 10.1088/0022-3727/42/19/195002
10. Zahradník M, Maroutian Th, Zelený M, Horák L, Kuriš G, Maleček T, Beran L, Višnovský Š, Agnus G, Lecoeur Ph, and Veis M, Electronic structure of  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ : Interplay of oxygen octahedral rotations and epitaxial strain. *Phys. Rev. B.* 2019;99:195138. DOI: 10.1103/PhysRevB.99.195138
11. Varvaro G, Trolino AD, Polimeni A, Gabbani A, Pineider F, de J. Fernandez C, Barucca G, Mengucci P, Bonapasta AA and Testa AM. Giant magneto-optical response in  $\text{H}^+$  irradiated  $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$  thin films. *J. Mater. Chem. C.* 2019;7:78-85. DOI: 10.1039/C8TC03563F
12. Cho YC, Kim S-J, Lee S, Kim SJ, Cho CR, Nahm H-H, Park CH, Jeong IK, Park S, Hong TE, Kuroda S, Jeong S-Y. Reversible ferromagnetic spin ordering governed by hydrogen in Co-doped ZnO semiconductor. *Appl. Phys. Lett.* 2009;95:172514. DOI: 10.1063/1.3257733
13. Samoshkina YuE, Edelman IS, Rautskii MV, Molokeev MS. Correlation between magneto-optical and transport properties of Sr doped manganite films. *J. Alloys Compd.* 2019;782:334. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.158
14. Granovskii AB, Sukhorukov YP, Telegin AV, Bessonov VD, Gan'shina EA, Kaul' AR, Korsakov IE, Gorbenko OYu, and Gonzalez J. Giant magnetorefractive effect in  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  films. *J. Exp. Theor. Phys.* 2011;112:77. DOI: 10.1134/S106377611005105X
15. Samoshkina YuE, Edelman IS, Chou H, Lin H-Ch, Dwivedi GD, Petrov DA, Zharkov SM, Zeer GM, Molokeev MS. Structure and physical properties of hydrogenated (Co+Al)-doped ZnO films: Comparative study with Co-doped ZnO films. *Mater. Sci. Eng., B.* 2021;264:114943. DOI: 10.1016/j.mseb.2020.114943
16. Scott GB, Lacklison DE, Ralph HI, and Page JL. Magnetic circular dichroism and Faraday rotation spectra of  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ . *Phys. Rev. B.* 1975;12(7):2562-2571. DOI: 10.1103/PhysRevB.12.2562
17. Samoshkina Yu, Edelman I, Chou H, Petrov D, Zharkov S, Neznakhin D, Stepanova E, Stepanov A. Magnetic circular dichroism of Co nanoparticles localized in matrices of various types. *Materialia* 2023;28:101759. DOI: 10.1016/j.mtla.2023.101759
18. Samoshkina Yu, Rautskii M, Neznakhin D, Stepanova E, Edelman I, Chou H. Particles-matrix bond in  $\text{ZnCoO:H}$  and  $\text{ZnCoAlO:H}$  films: issues of magnetism and spin injection. *Materials* 2023;16:3659. DOI: 10.3390/ma16103659
19. Burkova LV, Chzhan AV, Sokolov AE, Kosyrev NN, Patrino GS, Tabakaeva KV. Magneto-optical and optical properties of polycrystalline Co-P films with nanometer thickness. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2016;80(11):1314-1316. DOI: 10.3103/S1062873816110162
20. Coey JMD, Viret M, von Molnar S. Mixed-valence manganites. *Adv. Phys.* 1999;48:167e293. DOI: 10.1080/000187399243455.
21. Brik MG, Srivastava AM. On the optical properties of the  $\text{Mn}^{4+}$  ion in solids. *J. Lumin.* 2013;133:69-72. DOI: 10.1016/j.jlumin.2011.08.047
22. Czaja M, Lisiecki R, Chrobak A, Sitko R, Mazurak Z. The absorption- and luminescence spectra of  $\text{Mn}^{3+}$  in beryl and vesuvianite. *Phys Chem Minerals.* 2018;45:475-488. DOI: 10.1007/s00269-017-0934-x
23. Kaplan SG, Quijada M, Drew HD, Tanner DB, Xiong GC, Ramesh R, Kwon C, Venkatesan T. Optical evidence for the dynamic Jahn-Teller effect in  $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ . *Phys. Rev. Lett.* 1996;77(10):2081-2084. DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.2081
24. Okimoto Y, Katsufuji T, Ishikawa T, Arima T, Tokura Y. Variation of electronic structure in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $0 < x < 0.3$ ) as investigated by optical conductivity spectra. *Phys. Rev. B.* 1997;55(7):4206-4214. DOI: 10.1103/PhysRevB.55.4206
25. Moritomo Y, Machida A, Matsuda K, Ichida M, Nakamura A. Magnetization dependent behaviors of interband transitions between the exchange-split bands in doped manganite films. *Phys. Rev. B.* 1997;56(9):5088-5091. DOI: 10.1103/PhysRevB.56.5088

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

## Калориметрические измерения ВЧ-сигнала большой мощности

Р.В. Бударагин<sup>1</sup>, З.Ю. Саласенко<sup>1</sup>, А.Д. Серов<sup>2</sup>, И.А. Цветкова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,  
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия

<sup>2</sup>Научно-производственное предприятие «Юнион»,  
ул. Нартова, 2, этаж 2, помещ. 5, г. Нижний Новгород 603098, Россия

<sup>3</sup>Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в г. Саров,  
ул. Парковая, 8, г. Саров 607328, Нижегородская область, Россия

Поступила 21.01.2024

Принята к печати 09.09.2024

Представлена разработка измерителя ВЧ-сигналов большой мощности, основанного на методе калориметрических измерений, который в ряде случаев является единственно возможным. Устройство представляет систему элементов, обменивающихся либо энергией, либо информацией, работа и взаимосвязь которых обеспечивает устойчивость его функционирования. Основными элементами измерителя являются: согласованная нагрузка и двухконтурная водовоздушная система охлаждения, преобразующие ВЧ-энергию сначала в тепловую энергию электрического тока, а затем во внутреннюю энергию теплоносителя (рабочего тела). Система измерения и управления обеспечивает отображение информации на монитор и выработку внутренних управляющих сигналов. В работе делается акцент на процессе преобразования энергии электромагнитного излучения во внутреннюю энергию теплоносителя, так как согласованная ВЧ-нагрузка интегрируется в систему охлаждения и требует специальных конструктивных и технологических решений для обеспечения эффективной работы. Для испытания разработанного ВЧ-поглотителя мощностью до 5 кВт спроектирована система охлаждения и измерения ВЧ-сигнала. Параметры системы охлаждения определялись исходя из минимизации времени достижения теплового равновесия (времени установления показаний) и заданных параметров (входная температура не более 35 °С, перепад температуры не более 40 °С). По электродинамической модели, построенной методом частичных областей, определены геометрические размеры, при которых коэффициент стоячей волны по напряжению нагрузки в рабочем частотном диапазоне (от постоянного тока до 1300 МГц) будет наименьшим. Представлены результаты проектирования измерителя большой ВЧ-мощности, охлаждаемого жидкостью (водой), рассматриваются происходящие в ней теплофизические процессы и влияние наличия теплоносителя в контуре охлаждения.

**Ключевые слова:** метод калориметрического детектирования, система охлаждения, метод частичных областей, ВЧ-нагрузка

---

**Адрес для переписки:**

Саласенко З.Ю.  
Нижегородский государственный технический университет,  
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия  
e-mail: zina.salasenko@mail.ru

**Address for correspondence:**

Salasenko Z.IU.  
Nizhny Novgorod State Technical University,  
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia  
e-mail: zina.salasenko@mail.ru

---

**Для цитирования:**

Р.В. Бударагин, З.Ю. Саласенко, А.Д. Серов, И.А. Цветкова.  
Калориметрические измерения ВЧ-сигнала большой мощности.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 248–258.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

**For citation:**

Budaragin RV, Salasenko ZIU, Serov AD, Tsvetkova IA.  
Calorimetric Measurements of a High-Power RF Signal.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):248–258. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

# Calorimetric Measurements of a High-Power RF Signal

R.V. Budaragin<sup>1</sup>, Z.IU. Salasenko<sup>1</sup>, A.D. Serov<sup>2</sup>, I.A. Tsvetkova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia

<sup>2</sup>Scientific and Production Enterprise “Union”,  
Nartov str., 2, 5, Nizhny Novgorod 603098, Russia

<sup>3</sup>Branch of Lomonosov Moscow State University in Sarov,  
Parkovaya str., 8, Sarov 607328, Nizhny Novgorod region, Russia

Received 21.01.2024

Accepted for publication 09.09.2024

## Abstract

Development of a high-power RF signal meter based on the method of calorimetric measurements, which in some cases is the only possible one is presented. The device is as a system of elements exchanging either energy or information, the operation and interconnection of which ensures the stability of its functioning. The main elements of the device are: a coordinated load and a two-circuit water-air cooling system that convert RF energy first into thermal electrical energy, and then into internal energy of the coolant (working fluid). The measurement and control system provides information display on the monitor and generation of internal control signals. The work focuses on the process of converting electromagnetic energy into internal energy of the coolant, since the matched RF load is integrated into the cooling system and requires special design and technological solutions to ensure efficient operation. A cooling and measurement system has been designed to test the developed RF absorber with a power of up to 5 kW. The parameters of the cooling system were determined based on minimizing the time to achieve thermal equilibrium (time to establish readings) and the set parameters (input temperature no more than 35 °C, temperature difference no more than 40 °C). Based on calculations of the electrodynamic model constructed by the partial domain method, the geometric dimensions were determined at which the voltage standing wave ratio of the load in the operating frequency range (from DC to 1300 MHz) will be the smallest. The article presents the results of designing a high-frequency wattmeter cooled by a liquid (water), examines the thermophysical processes occurring in it and the influence of the presence of a coolant in the cooling circuit.

**Keywords:** calorimetric detection method, cooling system, partial domains method, microwave load

---

### Адрес для переписки:

Саласенко З.Ю.  
Нижегородский государственный технический университет,  
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия  
e-mail: zina.salasenko@mail.ru

### Address for correspondence:

Salasenko Z.IU.  
Nizhny Novgorod State Technical University,  
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia  
e-mail: zina.salasenko@mail.ru

---

### Для цитирования:

Р.В. Бударагин, З.Ю. Саласенко, А.Д. Серов, И.А. Цветкова.  
Калориметрические измерения ВЧ-сигнала большой мощности.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 3. С. 248–258.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

### For citation:

Budaragin RV, Salasenko ZIU, Serov AD, Tsvetkova IA.  
Calorimetric Measurements of a High-Power RF Signal.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(3):248–258. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

## Введение

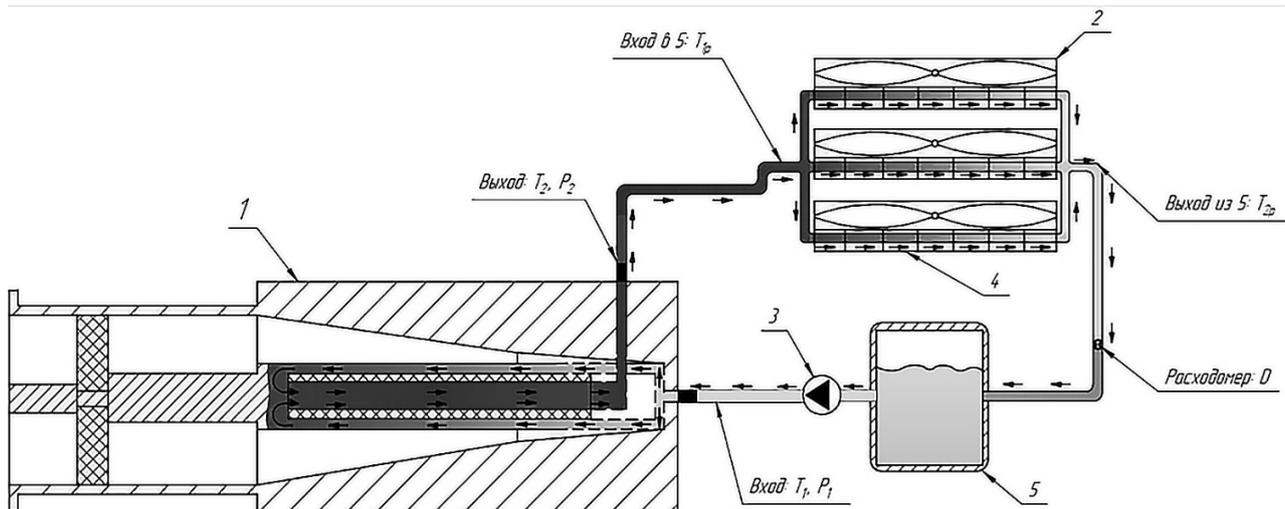
Метод калориметрического детектирования и измерения ВЧ-сигналов с большим (от десятков ватт до нескольких сотен киловатт) уровнем мощности является в ряде случаев единственно возможным методом [1], который основан на термодинамическом принципе действия. Он отличается от других методов повышенной точностью измерения [2], которая определяется эффективностью преобразования энергии электромагнитного излучения во внутреннюю энергию теплоносителя, а также точностью определения параметров охлаждающей жидкости (температуры, расхода). Важнейшим элементом данных систем измерения является мощный ВЧ-поглотитель (оконечная согласованная нагрузка) [3, 4], встроенный в систему охлаждения. Создание таких нагрузок вызывает определённые трудности, связанные с необходимостью внесения в конструкцию дополнительных элементов [5], обеспечивающих требуемый уровень теплоотдачи при хорошем согласовании нагрузки с ВЧ-трактом.

В данной статье приводятся результаты проектирования согласованной ВЧ-нагрузки большой мощности, охлаждаемой жидкостью (водой), описано влияние наличия теплоносителя на эффективность преобразования ВЧ-сигнала в тепловую энергию, а также рассмотрены теплофизические процессы [1, 6–11] в контуре охлаждения. Приведены

результаты проектирования системы измерения ВЧ-мощности с использованием данной ВЧ-нагрузки. Подобные системы могут быть успешно применены в области радиотехники [12].

## Расчёт и определение технических параметров ваттметра

На рисунке 1 представлена структурная схема калориметрической системы измерения ВЧ-сигнала. Одним из основных элементов является ВЧ-поглотитель (1), состоящий из керамического резистивного элемента (ВЧ-резистора), помещённого в согласующий экран. Система охлаждения поглотителя представляет собой замкнутую схему циркуляции жидкого теплоносителя (воды) в сочетании с воздушным отводом тепла, который происходит в решётках радиатора (4) с помощью вентиляторов (2). Теплоноситель поступает из герметичного бака (5) на вход ВЧ-нагрузки (1) с помощью циркуляционного насоса центробежного типа (3), у которого вход – осевой, выход – радиальный. Напор при этом создаётся действием подъёмной силы лопасти рабочего колеса на жидкость, т. е. давление жидкости повышается в основном за счёт действия центробежных сил. Таким образом, в замкнутом контуре охлаждения преобладает вынужденная конвекция, так как движение жидкости осуществляется путём воздействия на неё внешних сил.

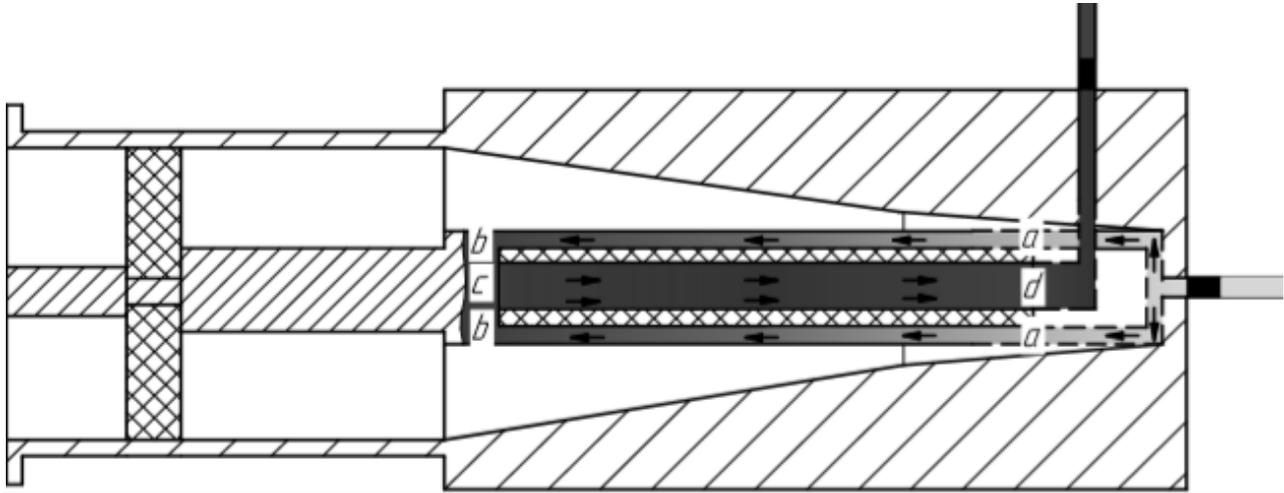


**Рисунок 1** – Структурная схема калориметрической системы измерения ВЧ-сигнала: 1 – ВЧ поглотитель; 2 – вентиляторы; 3 – циркуляционный насос; 4 – радиатор; 5 – герметичный бак

**Figure 1** – Block diagram of a calorimetric RF signal measurement system: 1 – HF absorber; 2 – fans; 3 – circulation pump; 4 – radiator; 5 – sealed tank

Процессы теплопередачи непосредственно связаны с условием движения жидкости. Фактором, оказывающим существенное влияние на эффективность преобразования

электромагнитной энергии в тепловую, является турбулентность течения теплоносителя внутри кольцевого зазора и внутри резистора (рисунок 2).



**Рисунок 2** – Турбулентность течения теплоносителя внутри кольцевого зазора и резистора

**Figure 2** – Turbulence of the coolant flow inside the annular gap and the resistor

Охлаждающая жидкость после входа в нагрузку проходит несколько участков, отмеченных на рисунке 2.

На участке *a-b* происходит первичное нагревание теплоносителя и соответственно охлаждение керамического резистивного элемента турбулентным потоком жидкости в зазоре с малой площадью проходного сечения. Нагрев теплоносителя происходит преимущественно с внутренней части трубопровода.

Участок *b-c-b* характеризуется смещением потоков жидкости, параметры которых равны из-за осевой симметрии и равномерного нагрева резистора.

Основная часть нагревания приходится на участок *c-d*, так как охлаждающая жидкость движется внутри трубопровода, внешним диаметром которого является внутренний диаметр горячего керамического элемента.

Поток охлаждающей жидкости внутри проходных каналов поглотителя, насыщенный беспорядочно движущимися вихрями, разделяется на две составляющих – вязкий подслой и ядро потока [6]. В вязком подслое происходит перенос теплоты посредством теплопроводности по нормали к стенке. В ядре турбулентного потока перенос тепла осуществляется интенсивным непрерывным

перемешиванием молекул жидкости. Данное явление сопровождается активным возникновением завихрений, которые переходят в ядро и, развиваясь, заполняют весь турбулентный поток. Из-за вязкости жидкости вихри постепенно затухают. Описанный процесс является непрерывным, но не основным при определении характера теплопередачи. Интенсивность теплопередачи в данном случае определяется термическим сопротивлением пристенного подслоя, где и происходит наибольшее изменение температуры вследствие теплопроводности.

Нагретый теплоноситель после охлаждения испытуемого образца попадает в распределительный коллектор, откуда поступает на три радиатора с воздушным охлаждением. Теплообмен между охлаждаемой жидкостью и охлаждающей средой протекает не за счёт их непосредственного соприкосновения [7], а путём передачи тепла через металлические стенки трубопровода, теплоёмкость которых осуществляется поперечным потоком атмосферного воздуха. Трубы на этом участке выполнены в виде змеевиков, что интенсифицирует теплопередачу, так как при повороте потока на  $180^\circ$  возникает центробежный эффект, т. е. поток жидкости будет

отжиматься к внешней стенке. При этом в поперечном сечении возникает вторичная циркуляция, за которой неизбежно следует увеличение скорости потока. Данные факторы способствуют увеличению турбулентности и среднего коэффициента теплоотдачи. Следует отметить, что подвод охлаждаемой жидкости в змеевик производится сверху, а отвод осуществляется снизу. Это обуславливается тем, что при охлаждении удельный вес воды увеличивается, её частицы стремятся вниз, что также увеличивает теплоотдачу.

Система циркуляции теплоносителя в данной установке замкнутая. После прохождения через воздушную систему охлаждения вода поступает в собирательный коллектор, откуда поступает в герметичный бак.

Как было отмечено ранее, перенос теплоты внутри теплоносителя осуществляется в основном путём перемешивания. Данный процесс должен быть интенсивен так, чтобы температура жидкости по сечению ядра потока оставалась практически постоянной. Резкое изменение температуры будет наблюдаться лишь внутри тонкого слоя у поверхности. Процесс конвективного теплообмена описывается системой дифференциальных уравнений: уравнением теплопроводности, уравнением Навье–Стокса, уравнением сплошности [1, 8, 9]:

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \cdot \nabla^2 t; \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\omega}{d\tau} = \rho \cdot q + \text{grad } P + \mu \cdot \nabla^2 \omega; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega_z)}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\rho$  – плотность вещества,  $q$  – плотность теплового потока;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $P$  – давление жидкости.

Чтобы ограничить задачу и дать полное математическое описание процесса преобразования электромагнитной энергии в энергию теплоносителя внутри ВЧ-поглопителя, были использованы краевые условия в совокупности с CFD моделированием. Это позволило визуализировать градиент температуры теплоносителя в рассматриваемой модели в виде цветового поля и добиться такой интенсивности процесса перемешивания, чтобы

поток теплоносителя носил турбулентный характер [10].

Условия однозначности состоят из:

1. Геометрических условий, т. е. известны внутренние и внешние диаметры трубы и кольцевого зазора, а также определены длины рассматриваемых участков.

2. Физических условий. В рассматриваемой установке рабочим телом является вода, она несжимаема и её физические свойства: теплопроводность  $\lambda(t)$ , теплоёмкость  $C_p(t)$ , динамическая вязкость  $\mu(t)$ , плотность  $\rho(t)$  – зависят от температуры.

3. Граничных условий, которые характеризуют особенности протекания процесса на границах тела. То есть особый интерес будет представлять коэффициент теплоотдачи, который определяется из следующих положений. Поток теплоты, который будет передаваться от стенки к жидкости, проходит через вязкостный подслой, прилегающий к поверхности, и может быть определён по закону Фурье:

$$dQ = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n \rightarrow 0} dF d\tau.$$

Однако для этого же элемента поверхности  $dF$  справедлив закон Ньютона–Рихмана:

$$dQ = \alpha(t_c - t_{\text{ж}}) dF d\tau.$$

Приравняв правые части этих уравнений, получим:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{(t_c - t_{\text{ж}})} \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n \rightarrow 0},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности (является физическим параметром);  $t_c$ ,  $t_{\text{ж}}$  – температуры стенки и жидкости соответственно.

Тепловой и гидродинамический расчёт позволили определить оптимальные геометрические параметры ВЧ-поглопителя, при которых преобразование электрической энергии в тепловую наиболее эффективно. Длина резистивного элемента (ВЧ-резистора) составляет 130 мм, внутренний диаметр 9 мм ( $63 \text{ мм}^2$ ), внешний диаметр 13 мм, диаметр трубопровода (полипропиленовый кожух, в который помещён СВЧ-резистор) равен 16 мм (площадь кольцевого зазора прохода воды равна  $68 \text{ мм}^2$ ). С помощью CFD-моделирования установлено, что при теплоотдаче резистора  $\approx 27 \text{ Вт/см}^2$  перепад температур не превышает  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

гидравлические потери конструкции составили 0,327 атм.

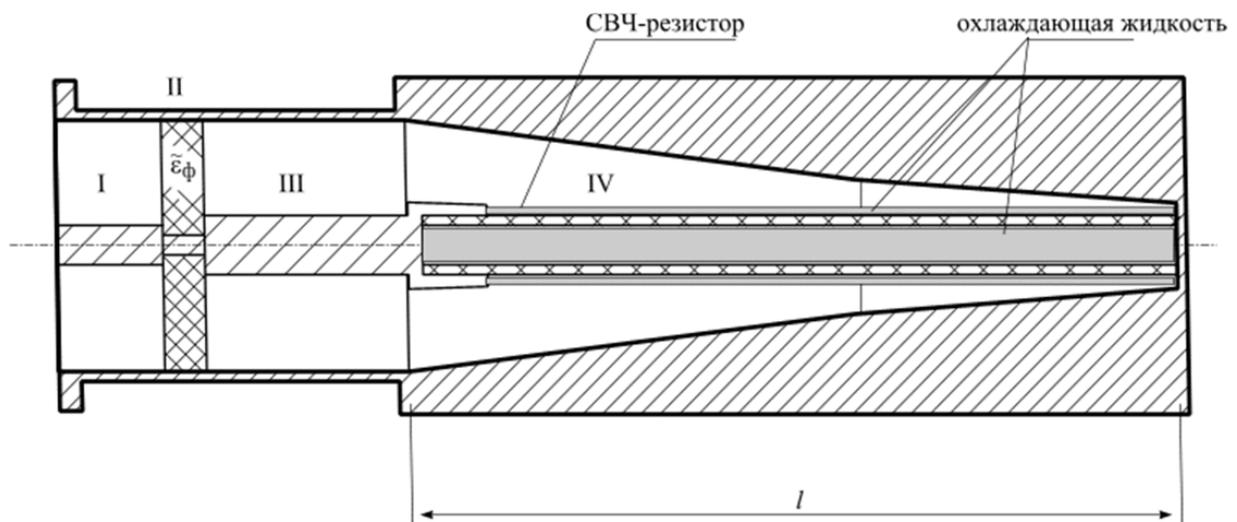
Данные об изменении температуры при охлаждении керамического элемента дают возможность определить значение критериального числа Рейнольдса [11]. Расчёт проводился для значений максимально достигнутой мощности  $P = 5$  кВт и перепаде температур  $40$  °С при максимально допустимой температуре на входе ВЧ-нагрузки  $35$  °С. Расход теплоносителя при этом составил  $G \approx 2$  кг/мин, а рассчитываемое значение числа Рейнольдса превысило  $Re_{расч} \approx 2,94 \cdot 10^3$ .

Сравнивая полученный результат с критическим значением числа Рейнольдса

$Re_{расч} > Re_{кр} \approx 2 \cdot 10^3$ , можно сделать вывод, что режим течения теплоносителя имеет турбулентный характер.

Для согласования ВЧ-поглотителя с волноводным трактом необходимо разработать его электродинамическую модель с учётом наличия охлаждающей жидкости в проходных зазорах, геометрические параметры которых строго определены исходя из тепловой схемы.

Согласно электродинамической модели, ВЧ-поглотитель, конструкция которого представлена на рисунке 3, можно представить в виде соединённых между собой отрезков частично заполненных волноводов круглого сечения.



**Рисунок 3** – Электродинамическая модель ВЧ-поглотителя: I, II, III – коаксиальные волноводы; IV – область поглощения ВЧ-энергии

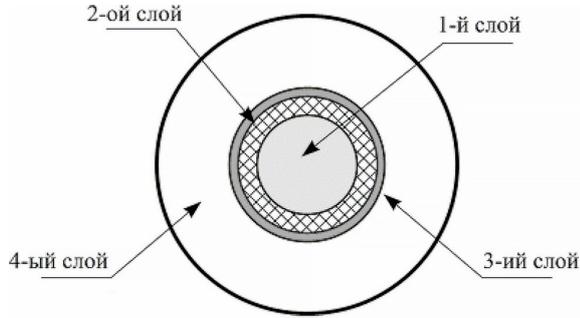
**Figure 3** – Electrodynamical model of the RF absorber: I, II, III are coaxial waveguides; IV is the RF energy absorption region

Области I, II, III – коаксиальные волноводы, параметры которых обеспечивают согласование нагрузки с подводящим трактом. Область IV – область, в которой происходит поглощение ВЧ-энергии и преобразование её в тепловую энергию охлаждающей жидкости. Эту область считаем круглым нерегулярным экранированным волноводом с четырёхслойным заполнением (схематический разрез представлен на рисунке 4). Внешний, четвёртый, слой заполнен воздухом. Второй слой представляет собой пористый керамический ВЧ-резистор, который при поглощении ВЧ-энергии постепенно нагревается до критической температуры. Первый и третий

слои являются частью контура охлаждения, по которому непрерывно циркулирует охлаждающая жидкость (вода).

Для построения электродинамической модели ВЧ-поглотителя применили метод частичных областей [4, 13]. Данный метод относится к группе численно-аналитических, т. е. на первом этапе реализации проводится аналитическое решение задачи, которое затем сводится к системе линейных алгебраических уравнений на втором этапе. Метод отличается большой универсальностью и рядом достоинств при численной реализации ввиду того, что позволяет легко получить общие соотношения амплитудных коэффициентов волн,

распространяющихся в рассматриваемом волноводном тракте. Кроме того, метод частичных областей – строгий электродинамический метод и для поставленной задачи является наиболее быстродействующим по сравнению с численными методами, лежащими в основе таких САПР, как HFSS, CST STUDIO и др.



**Рисунок 4** – Схематический разрез круглого нерегулярного экранированного волновода с четырёхслойным заполнением: 1, 3 слои – часть контура охлаждения, заполнены охлаждающей жидкостью; 2 слой – керамический ВЧ-резистор; 4 слой – заполнен воздухом

**Figure 4** – Schematic section of a circular irregular shielded waveguide with a four-layer filling: 1, 3 layers are part of the cooling circuit, filled with coolant; 2 layer is a ceramic RF resistor; 4 layer is filled with air

Из бесконечного коаксиального волновода I на ВЧ-переход падает основная  $T$ -волна единичной мощности. В волноводе I дифракционное поле представим в виде падающей основной волны и суммы отражённых собственных волн коаксиального волновода:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \mathbf{E}^{(1)} \\ \mathbf{H}^{(1)} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_0^{(1)} \\ \mathbf{H}_0^{(1)} \end{Bmatrix} e^{-\beta_0^{(1)} z} + \\ &+ A_0 \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_0^{(1)} \\ -\mathbf{H}_0^{(1)} \end{Bmatrix} e^{\beta_0^{(1)} z} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_n^{(1)} \\ -\mathbf{H}_n^{(1)} \end{Bmatrix} e^{\beta_n^{(1)} z}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\mathbf{E}_0^{(j)}(r) = \hat{r}^2 \frac{1}{r}$ ,  $\mathbf{H}_0^{(j)}(r) = i\hat{e} \mu_0 \hat{u}^{(j)} \cdot \frac{1}{r}$  – электрическое и магнитное поля основной волны коаксиального волновода;  $\beta_0^{(j)} = k_0 \sqrt{\tilde{\epsilon}^{(j)}}$  – постоянная распространения основной волны коаксиального волновода вдоль оси  $z$ ;  $\tilde{\epsilon}^{(j)}$  – диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего пространство между центральным проводником и экраном коаксиального волновода;  $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$  – постоянная распространения в свободном пространстве;  $\epsilon_0, \mu_0$  – диэлектрическая

и магнитная постоянные;  $A_0$  и  $A_n$  – амплитудные коэффициенты отражённых основной волны и волн высших типов, соответственно. Для волн типа  $-E$  ( $n > 1$ ):

$$E_n^{r(j)}(r) = i\beta_n^{(j)} \cdot \alpha_n^{(j)} \cdot (J_1(\alpha_n^{(j)} \cdot r) \times Y_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) - J_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) \cdot Y_1(\alpha_n^{(j)} \cdot r));$$

$$H_n^{\varphi(j)}(r) = i\omega \epsilon \alpha_n^{(j)} \times (J_1(\alpha_n^{(j)} \cdot r) \cdot Y_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) - J_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) \cdot Y_1(\alpha_n^{(j)} \cdot r)),$$

где  $\beta_n^{(j)} = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \tilde{\epsilon}^{(j)} \mu_0 - \alpha_n^{(j)}}$ ,  $\alpha_n^{(j)}$  – постоянные распространения  $n$ -ой ( $n > 1$ ) собственной волны в  $j$ -ом волноводе. Поперечная постоянная распространения  $\alpha_n^{(j)}$  определяется из дисперсионного уравнения:

$$J_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) \cdot Y_0(\alpha_n^{(j)} \cdot d_j) - J_0(\alpha_n^{(j)} \cdot d_j) \cdot Y_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) = 0,$$

где  $J_n(x)$ ,  $Y_n(x)$  – функции Бесселя 1-го и 2-го рода. Штрих при функции означает нахождение производной по аргументу, стоящему в скобках;  $d_j, D_j$  – радиусы центрального проводника и экрана в  $j$ -ом регулярном коаксиальном волноводе.

В формуле (4), и далее в (5) и (6) учтено то, что вследствие симметрии рассматриваемой ВЧ-структуры, на стыках волноводов сравнения возбуждаются только симметричные собственные волны  $E$ -типа.

Поле дифракции в областях  $j = \text{II}, \text{III}$  представили в виде бесконечной суммы прямых и обратных собственных волн коаксиального волновода:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \mathbf{E}^{(j)} \\ \mathbf{H}^{(j)} \end{Bmatrix} &= \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} B_n \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_n^{(j)} \\ \mathbf{H}_n^{(j)} \end{Bmatrix} e^{-i\beta_n^{(j)} z} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_n^{(j)} \\ -\mathbf{H}_n^{(j)} \end{Bmatrix} e^{i\beta_n^{(j)} z}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\mathbf{E}_n^{(j)}, \mathbf{H}_n^{(j)}$  – запись электрического и магнитного полей рассматриваемого волновода – выражения для собственных функций электрического и магнитного полей  $T$ -волны и симметричных  $E$ -волн однородно заполненного коаксиального волновода;  $B_n$  и  $C_n$  – амплитудные коэффициенты падающих и отражённых волн, соответственно;  $\beta_n^{(\text{II,III})}$  – постоянные распространения этих волн вдоль продольной оси  $z$ .

В области IV поле представили в виде бесконечного набора стоячих волн четырёхслойного круглого экранированного волновода (рисунок 4):

$$\begin{cases} \mathbf{E}^{(IV)} \\ \mathbf{H}^{(IV)} \end{cases} = \sum_{n=1}^{\infty} N(z)_n \begin{cases} \mathbf{E}_n^{(IV)} \\ \mathbf{H}_n^{(IV)} \end{cases} \begin{cases} \sin(\beta_n^{IV}(z) \cdot z) \\ \cos(\beta_n^{IV}(z) \cdot z) \end{cases}, \quad (6)$$

где  $N(z)_n$  – амплитудные коэффициенты этих волн, зависящие от продольной координаты;  $\mathbf{E}_n^{(IV)}, \mathbf{H}_n^{(IV)}$  – собственные функции их электрического (магнитного) полей.

Записали условие равенства касательных компонент полей (4)–(6) на стыках волноводов I–IV, и умножив на соответствующие компоненты полей собственных волн регулярных волноводов, интегрировали по сечению соответствующего регулярного волновода. С учётом энергетической ортогональности собственных волн, получили систему линейных алгебраических уравнений относительно амплитуд волн в каждой области. Решив данную систему уравнений, нашли искомые коэффициенты  $A_n, B_n^{(j)}, C_n^{(j)}$  и  $N(z)_n$ .

При записи полей собственных волн волноводов соответствующих областей I и IV полагалось, что металлические поверхности этих волноводов – идеально проводящие. Данное предположение вполне допустимо для указанных волноводов, так как удельное сопротивление меди, из которой изготовлены волноводы, много меньше удельного сопротивления углеродистого проводящего слоя ВЧ-резистора.

Область IV с плавным изменением профиля волновода рассматривалась как ступенчатый переход, аппроксимирующий данное плавное изменение, количество ступеней  $K$  определяется по внутренней сходимости решения задачи. Диэлектрическая проницаемость воды для рассматриваемого диапазона частот имеет только действительное значение равное 81 [14].

При проведении численных исследований влияния геометрических параметров поглотите-

ля на его согласование с подводящим трактом производился расчёт амплитуды отражённой основной волны  $A_0$  в коаксиальном волноводе I (рисунок 3).

Результаты численных значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН)  $КСВН = 1 + |A_0|/1 - |A_0|$ , в диапазоне частот представлен в таблице.

Для проведения испытаний была спроектирована ВЧ-нагрузка для измерения ВЧ мощности до 5 кВт. Исходя из расчётов и оптимизации параметров электродинамической модели, были определены геометрические размеры, при которых КСВН нагрузки в рабочем частотном диапазоне (от постоянного тока до 1300 МГц) будет наименьшим ( $< 1,1 \dots 1,15$ ). Конструкция нагрузки приведена на рисунке 5, где  $a = 20,6$  мм,  $b = 78,2$  мм,  $c = 29,4$  мм,  $d = 38,7$  мм,  $\alpha_1 = 7^\circ 20'$ ,  $\alpha_2 = 5^\circ 45'$ . Входной волновод нагрузки – коаксиальный 38,5/17.

Таблица / Table

**Результаты численных значений коэффициент стоячей волны по напряжению**

**Results of numerical values of voltage standing wave ratio**

Частота, МГц Frequency, MHz	КСВН VSWR
50	1,021
100	1,032
200	1,052
400	1,108
700	1,032
1000	1,143
1300	1,154

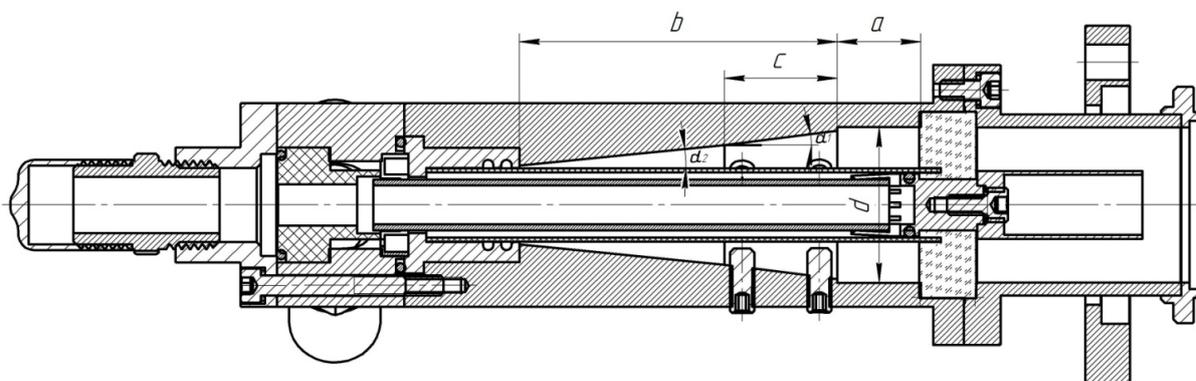
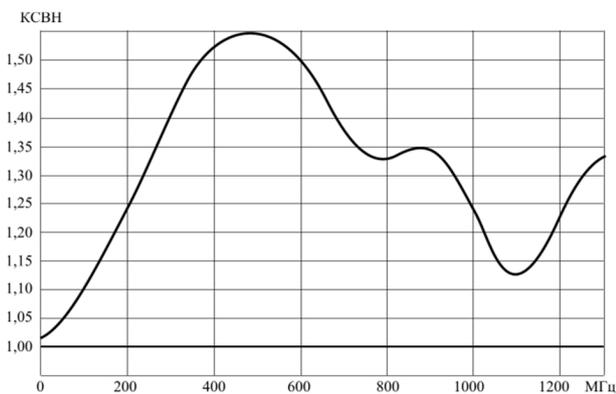


Рисунок 5 – Конструкция экспериментального образца ВЧ-нагрузки

Figure 5 – Design of the experimental RF load sample

На рисунках 6 и 7 представлены зависимости КСВН экспериментального образца ВЧ-нагрузки в частотном диапазоне. Измерения проводились на векторном анализаторе цепей ОБЗОР TR 1300/1 с комплектом калибровочных мер № 1.2 при нормальном атмосферном давлении, температуре окружающего воздуха 25 °С и влажности 42 %.

График на рисунке 6 соответствует измерению образца без охлаждающей жидкости. Следует отметить, что уровень КСВН в рабочем диапазоне частот достаточно высок и достигает значения более чем 1,5.

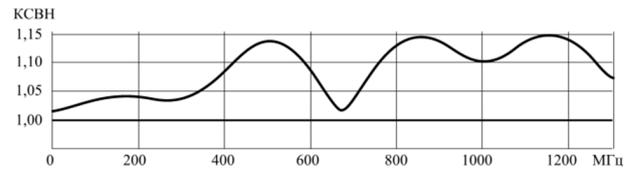


**Рисунок 6** – Зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению экспериментального образца ВЧ-нагрузки без охлаждающей жидкости в частоты

**Figure 6** – Dependence of the voltage standing wave ratio for the experimental sample without coolant of the RF load on the frequency

График на рисунке 7 соответствует случаю, когда нагрузка полностью заполнена теплоносителем – дистиллированной водой при температуре 25 °С ( $\rho_H = 6,5$ , удельная электрическая проводимость при температуре 25 °С не более  $5,1 \cdot 10^{-4}$  См/м). Из графика следует, что КСВН нагрузки не превышает 1,15 вплоть до 1300 МГц, а в диапазоне от постоянного тока до 400 МГц КСВН ниже 1,1, что соответствует уровню современных зарубежных аналогов таких нагрузок. Таким образом, наличие тонких (не более 2 мм) слоёв жидкости (воды) значительно влияет на частотные характеристики нагрузки.

Контроль параметров при испытании ВЧ-нагрузки осуществлялся с помощью датчиков расхода жидкости и давления, датчиков температуры охлаждающей жидкости на входе и на выходе образца.



**Рисунок 7** – Зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению экспериментального образца ВЧ-нагрузки с охлаждающей жидкостью от частоты

**Figure 7** – Dependence of the voltage standing wave ratio for the experimental sample with a coolant of the RF load on the frequency

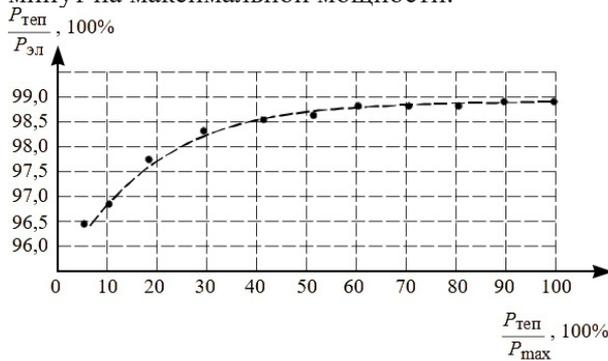
Датчики, позволяющие получить значения теплоперепада при охлаждении резистора, расположены в ядре потока. Для получения точных значений, в контуре охлаждения установлен турбулентный режим течения жидкости. Это решение обусловлено тем, что при данном режиме распределение скорости по сечению трубы имеет вид усеченной параболы, т. е. в ядре турбулентного потока скорость жидкости будет практически неизменной для всех точек (исключением является тонкий вязкостный подслой вблизи стенки трубы). Ламинарный режим течения характерен тем, что каждый слой жидкости имеет различную скорость продольного движения, т. е. распределение носит параболический характер. Данный фактор усложняет расчёт температуры жидкости на исследуемом участке, так как появляется необходимость произвести усреднение температуры по сечению, что негативно влияет на точность полученных экспериментальных данных. Получение средней температуры при ламинарном режиме одним измерением без последующих вычислений возможно лишь в том случае, если перед местом измерения жидкость перемешать, это усложнит конструкцию установки и повлияет на требование экономичности.

В качестве основного блока управления датчиками использовался микроконтроллер ATmega328, который поддерживает работу с датчиками разных типов и интерфейс I2C. Для отображения полученных данных установлена индикация в виде монохромного символьного дисплея 1602a QAPASS, встроенного в корпус устройства. Работа с дисплеем производится по шине интерфейса I2C, что упрощает передачу данных с микроконтроллера.

В качестве датчиков температуры были выбраны термопары К-типа с диапазоном измерений от минус 250 °С до 1300 °С, принцип действия которых основан на термоэлектрическом эффекте. Возникающая при измерениях термо-ЭДС слишком мала для измерения микроконтроллером напрямую. Снимаемые с датчиков температуры значения усиливаются и оцифровываются при помощи аналого-цифрового преобразователя MAX6675.

Датчик расхода теплоносителя – цифровой, основанный на эффекте Холла. По количеству зарегистрированных импульсов прерываний в единицу времени определяется скорость потока жидкости и её расход.

Измерения расхода и значений температур теплоносителя на входе и выходе ВЧ-нагрузки дают возможность определить значения тепловой мощности, отводимой от керамического элемента системой охлаждения. Калибровка ВЧ-измерений проводилась на переменном токе 50 Гц подачи на устройство соответствующей мощности [12]. На рисунке 8 представлен график отношения  $P_{\text{теп}}/P_{\text{эл}}$  мощности, измеренной на нагрузке с помощью вольтметра и амперметра, к мощности, определяемой по датчикам перепада температуры и расхода жидкости в зависимости от величины отводимой мощности  $P_{\text{теп}}/P_{\text{max}}$ , где  $P_{\text{max}} = 5$  кВт. Время установления показаний не превышает одной минуты на мощностях ниже 1 кВт, и 10-и минут на максимальной мощности.



**Рисунок 8** – Зависимость отношения мощностей  $P_{\text{теп}}/P_{\text{эл}}$  к отношению мощностей  $P_{\text{теп}}/P_{\text{max}}$

**Figure 8** – Dependence of the ratio of powers  $P_{\text{therm}}/P_{\text{el}}$  on of the ratio powers  $P_{\text{therm}}/P_{\text{max}}$

Как следует из графика зависимости данное отношение достаточно близко к 100 %, особенно на больших уровнях мощности, что указывает на эффективность работы контура охлаждения.

## Заключение

Представлена разработка измерителя ВЧ-сигнала большой мощности методом определения параметров охлаждающей жидкости. Предложенная электродинамическая модель ВЧ-нагрузки учитывает её технологические и конструктивные особенности – наличие слоёв поглощающего мощность пиролитического углерода и движущегося теплоносителя (воды), наличие которых существенно влияет на величину коэффициента стоячей волны по напряжению. Для экспериментальной проверки разработана и изготовлена двухконтурная замкнутая система охлаждения, позволяющая обеспечить уровень рассеиваемой ВЧ-мощности до 5 кВт. Также рассмотрены процессы, влияющие на эффективность преобразования ВЧ-мощности в тепловую и, соответственно, на точность измерений. В результате оптимизации системы точность измерений составила более 95 %.

## Список использованных источников

1. Попов, И.А. Физические основы и промышленное применение интенсификации тепло-обмена: Интенсификация теплообмена: монография / И.А. Попов, Х.М. Махьянов, В.М. Гуреев; под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с.
2. Власова, К.В. Структурная схема измерительного стенда для измерения электрической мощности калориметрическим методом / К.В. Власова // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 4. – С. 987–991.
3. Killinger A., Gantenbein G., Illy S., Ruess T., Weggen J., Martinez-Garcia V. Plasma Spraying of a Microwave Absorber Coating for an RF Dummy Load. THE Coatings, 11(7):801.  
**DOI:** 10.3390/COATINGS11070801
4. Jiang H.C. Microwave power thin film resistors for high frequency and high power load applications / H.C. Jiang [et al.] // Applied Physics Letters. – 2010. – Vol. 97, No. 17. – P. 173504-3.  
**DOI:** 10.1063/1.3507883
5. Ryu S.K. High-voltage ultra wideband coaxial load with distributed ceramic-carbon-rod resistor / S.K. Ryu [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2012. – Vol. 54, No. 3. – Pp. 681–684.  
**DOI:** 10.1109/TEMC.2012.2197001
6. Кириллов П.Л. Теплообмен в турбулентном потоке. Ч. 2. Распределение скорости и температуры / П.Л. Кириллов // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – № 4. – С. 192–203.

7. Vlasova S.S., Prosviryakov E.Yu. Two-dimensional convection of an incompressible viscous fluid with the heat exchange on the free border, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.]*, 2016, Vol. 20, No. 3. – Pp. 567–577. **DOI:** 10.14498/vsgtu1483

8. Андреопулос Я. Корреляция завихренности и скорости в сжимаемых потоках: экспериментальное исследование плотности спиральности в турбулентном потоке и вихрях / Я. Андреопулос // *Электрохимия*. – 2008. – Т. 44. – № 4. – С. 422–428.

9. Salnikov M.V. Swirl flow in a cylindrical container: lattice Boltzmann equations and Navier-Stokes equations / M.V. Salnikov [et al.] // In: *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2022. – Vol. 29, No. 4. – Pp. 531–541. **DOI:** 10.1134/S0869864322040060

10. Manzhai V.N. Behavioral model of macromolecules in a turbulent flow and its analytical consequences / V.N. Manzhai, K.B. Konovalov, M.A. Kazaryan // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2017. – Vol. 44, No. 12. – Pp. 347–349. **DOI:** 10.3103/S1068335617120016

11. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена в трубах с турбулизаторами при турбулентном течении при высоких числах Рейнольдса / И.Е. Лобанов // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2017. – Т. 21. – № 4(78). – С. 69–77.

12. Измерения генерируемой СВЧ-мощности и тепловых нагрузок при испытаниях прототипов гиротронов ИТЭР на испытательном стенде / В.И. Ильин [и др.] // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. – 2011. – № 2. – С. 53–57.

13. Бударагин Р.В. Исследование относительной сходимости решения при расчете ступенчатых нерегулярностей в линии передачи методом частичных областей с использованием условия энергетической ортогональности / Р.В. Бударагин, Ю.А. Зыков, А.А. Радионов // *Антенны*. – 2021. – № 2(270). – С. 35–38. **DOI:** 10.18127/j03209601-202102-05

14. Рекомендации МСЭ-R серии Р. 527-4, Электрические характеристики земной поверхности. Серия Р. Распространение радиоволн, 2017, № 06.

## References

1. Popov IA, Makhyanov NM, Gureev VM. Physical foundations and industrial application of heat transfer intensification: Heat transfer intensification: monograph. Kazan: Center for Innovative Technologies, 2009. 560 p.

2. Vlasova KV. Block diagram of a measuring stand for measuring electrical power by the calorimetric method. *Issues of sustainable development of society*. 2022;(4):987-991.

3. Killinger A, Gantenbein G, Illy S, Ruess T, Weginger J, Martinez-Garcia V. Plasma Spraying of a Microwave Absorber Coating for an RF Dummy Load. *Coatings* 2021;11(7):801. **DOI:** 10.3390/COATINGS11070801

4. Jiang HC. [et al.] Microwave power thin film resistors for high frequency and high power load applications. *Applied Physics Letters*. 2010;97(17):173504-3. **DOI:** 10.1063/1.3507883

5. Ryu SK. [et al.] High-voltage ultra wideband coaxial load with distributed ceramic-carbon-rod resistor. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2012;54(3):681-684. **DOI:** 10.1109/TEMC.2012.2197001

6. Kirillov PL. Heat transfer in a turbulent flow. Part 2. Distribution of velocity and temperature. *Atomic energy*. 2017;122(4):192-203.

7. Vlasova SS, Prosviryakov EYu. Two-dimensional convection of an incompressible viscous fluid with the heat exchange on the free border, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.]*. 2016;20(3):567-577. **DOI:** 10.14498/vsgtu1483

8. Andreopoulos Ya. Correlation of vorticity and velocity in compressible flows: experimental study of helicity density in turbulent flow and vortices. *Electrochemistry*. 2008;44(4):422-428.

9. Salnikov MV. [et al.]. Swirl flow in a cylindrical container: lattice Boltzmann equations and Navier—Stokes equations. *Thermophysics and aeromechanics*. 2022;29(4):531-541. **DOI:** 10.1134/S0869864322040060

10. Manzhai VN, Konovalov KB, Kazaryan MA. Behavioral model of macromolecules in a turbulent flow and its analytical consequences. *Brief reports on physics of the FIAN*. 2017;44(12):347-349. **DOI:** 10.3103/S1068335617120016

11. Lobanov IE. Mathematical modeling of intensified heat transfer in pipes with turbulators in turbulent flow at high Reynolds numbers. *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2017;21(4(78)):69-77.

12. Ilyin VI. [et al.]. Measurements of the generated microwave power and thermal loads during testing of ITER gyrotron prototypes on a test bench. *Issues of atomic science and technology. Series: Thermonuclear fusion*. 2011;(2):53-57.

13. Budaragin R, Zykov YuA, Radionov AA. The study of the relative convergence of the solution when calculating stepwise irregularities in a transmission line by the partial domain method using the energy orthogonality condition. *Antennas*. 2021;270(2):35-38. **DOI:** 10.18127/j03209601-202102-05

14. ITU-R recommendations of the P. 527-4 series, Electrical characteristics of the Earth's surface. Series R. Propagation of radio waves, 2017, No. 06.

# ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РФ от 28.02.2014 г. № 3

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows, набор – сплошным текстом (без деления на колонки). Объём статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

5. На первой странице статьи указываются: название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звёздочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200–250 слов); ключевые слова (не более 5); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть; заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках.

6. Аннотация должна быть информативной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Графический материал должен быть контрастным и чётким. Необходимо придерживаться единообразия техники исполнения однотипных иллюстраций. Рисунок должен располагаться после абзаца, содержащего ссылку на него. Не допускается размещение рисунков в конце подраздела и статьи. Изобразительный материал вставляется в текст статьи, а также даётся в виде отдельных файлов (**формат tif, jpg, разрешение не менее 300 dpi**). Текст на рисунках набирается основной гарнитурой; размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 8 пунктов). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются

строчными курсивными латинскими буквами – «a», «b» и т. д. Надписи на рисунках и подписи к рисункам даются на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Рисунки желательно предоставлять в цвете. На рисунках должны быть указаны оси с обозначением приводимых величин и масштабов. На графиках не нужно давать координатную сетку, если это не осциллограмма. Во всех случаях на рисунках должен быть приведён масштаб.

8. У графиков, имеющих числовые значения по осям, рамки должны быть открыты, а засечки направлены внутрь рамки. На рисунках, представляющих собой графики зависимостей, не следует делать размерную сетку, следует дать лишь засечки на осях, причем все засечки должны быть оцифрованы. Если оси на рисунках оцифрованы, то они завершаются на позиции очередной засечки, где засечка не ставится, а вместо числовых значений даются обозначения переменной и единица измерения. Если оси не оцифровываются, то они завершаются стрелками, рядом с которыми даются обозначения переменных без единиц измерения.

9. Полутонные фотографии приборов или их частей представляются при публикации в тех случаях, когда они несут существенную информацию, которую нельзя выразить иным способом. Фотографии должны быть высококачественными, контрастными, с хорошо различимыми деталями.

10. Иллюстрации (графики, диаграммы, схемы, чертежи), рисованные средствами MS Office, должны быть контрастными и чёткими. Недопустимо нанесение средствами MS Word каких-либо элементов поверх вставленного в файл рукописи рисунка (стрелки, подписи) ввиду большого риска их потери на этапах редактирования и вёрстки. Иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8,5 см (на одну колонку), 17–17,5 см (на две колонки) или 23 см (во весь лист). Поэтому желательно изображать отдельные элементы и надписи на рисунке так, чтобы при уменьшении масштаба рисунка до одного из указанных размеров буквы и цифры приобрели высоту 2–2,5 мм, элементы схем 3–5 мм, отдельные точки 1 мм, а линии должны быть при этом разнесены на расстояние не менее 0,5–1 мм.

11. Надписи и обозначения на иллюстрациях следует располагать так, чтобы они не соприкасались ни с какими её частями. На задний план иллюстрации желательно не добавлять серый (цветной) фон или сетки.

12. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы

# ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

---

и рисунки следует давать ссылки в тексте. Таблицы не должны содержать вертикальные линии, делящие таблицу на столбцы. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

13. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

14. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

15. Набор формул должен проводиться в редакторе MathType целиком. Набор формул из составных элементов не допускается, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте.

16. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: полный – 10 пт, подстрочный – 9 пт, под-подстрочный – 7 пт, символ – 14,5 пт, подсимвол – 12,5 пт. Стили: текст, функция, число, кириллица – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», жирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив.

17. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **русский алфавит не используется**; греческие буквы, математические символы ( $\text{grad}$ ,  $\text{div}$ ,  $\ln$ ,  $\min$ ,  $\max$  и др.), единицы измерения (Вт, Дж, В, кг и др.), кириллические буквы, сокращения от русских слов ( $q_{\text{ср}}$ ); обозначения химических элементов и соединений (в т. ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т. ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверх не ставятся).

18. Начертание обозначений в формулах и в основном тексте должно быть полностью идентично. В расшифровке формул, которая начинается словом «где»,

символы и их порядок должны соответствовать символам и их порядку следования в формулах.

19. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

20. Авторы на отдельной странице предоставляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

21. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

22. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

23. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

24. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

25. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

---

# AUTHOR GUIDELINES

---

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.
  2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.
  3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.
  4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).
  5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.
  6. The abstract should be informative (contain "squeeze" from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).
  7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be described.
  8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.
  9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.
  10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.
  11. Formulas should be typed in MathType.
  12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without DOI number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %.
  13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.
  14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.
  15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.
  16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.
  17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.
  18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.
-

---

## Информация для подписчиков и рекламодателей

Научно-технический журнал «Приборы и методы измерений» издается 4 раза в год, на русском и английском языке. Распространяется на территории Беларуси, России и странах СНГ. В журнале публикуются оригинальные статьи прикладного и фундаментального характера, а также обзорные статьи о современном состоянии, важнейших достижениях и тенденциях развития приборостроительной отрасли в Республике Беларусь и за рубежом.

Журнал «Приборы и методы измерений» является отличной площадкой для продвижения результатов научных исследований не только известных, но и начинающих исследователей. Журнал включён в крупнейшие базы данных научного цитирования Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет, которые признаны самыми авторитетными для мирового научного сообщества.

Оформить подписку на журнал можно через подписные каталоги:  
РУП «Белпочта», ООО «Прессинформ», ООО «Криэйтив Сервис Бэнд»,  
ООО «Екатеринбург-Опт», ООО «Глобалпресс»

**Подписной индекс журнала «Приборы и методы измерений»:**  
**Ведомственный – 748352**                      **Индивидуальный – 74835**

Предлагаем услуги по размещению рекламы  
в журнале «Приборы и методы измерений»

---

Вид рекламного модуля	Для Республики Беларусь Стоимость в бел. руб. с НДС	Для стран СНГ Стоимость в рос. руб.
На обложке (стр. 2, 3) полноцветный	689,88	26975
Внутри журнала (формат 1/1), полноцветный	536,49	20950
Внутри журнала (формат 1/2), полноцветный	263,27	11235
Внутри журнала (формат 1/1), черно-белый	363,10	11235
Внутри журнала (формат 1/2), черно-белый	181,56	5390

---

Размещение рекламы в очередном номере осуществляется после предварительной оплаты  
Заказчиком

Информацию для рекламодателей можно получить по тел. (+375) 44 566 47 88,  
**e-mail: l.katkova@bntu.by**

**Адрес и телефоны редакции:**

Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 17, каб. 432  
тел.: +375 17 293 96 67

**www.pimi.bntu.by e-mail: pimi@bntu.by**

---

Индексы:  
74835; 748352

