



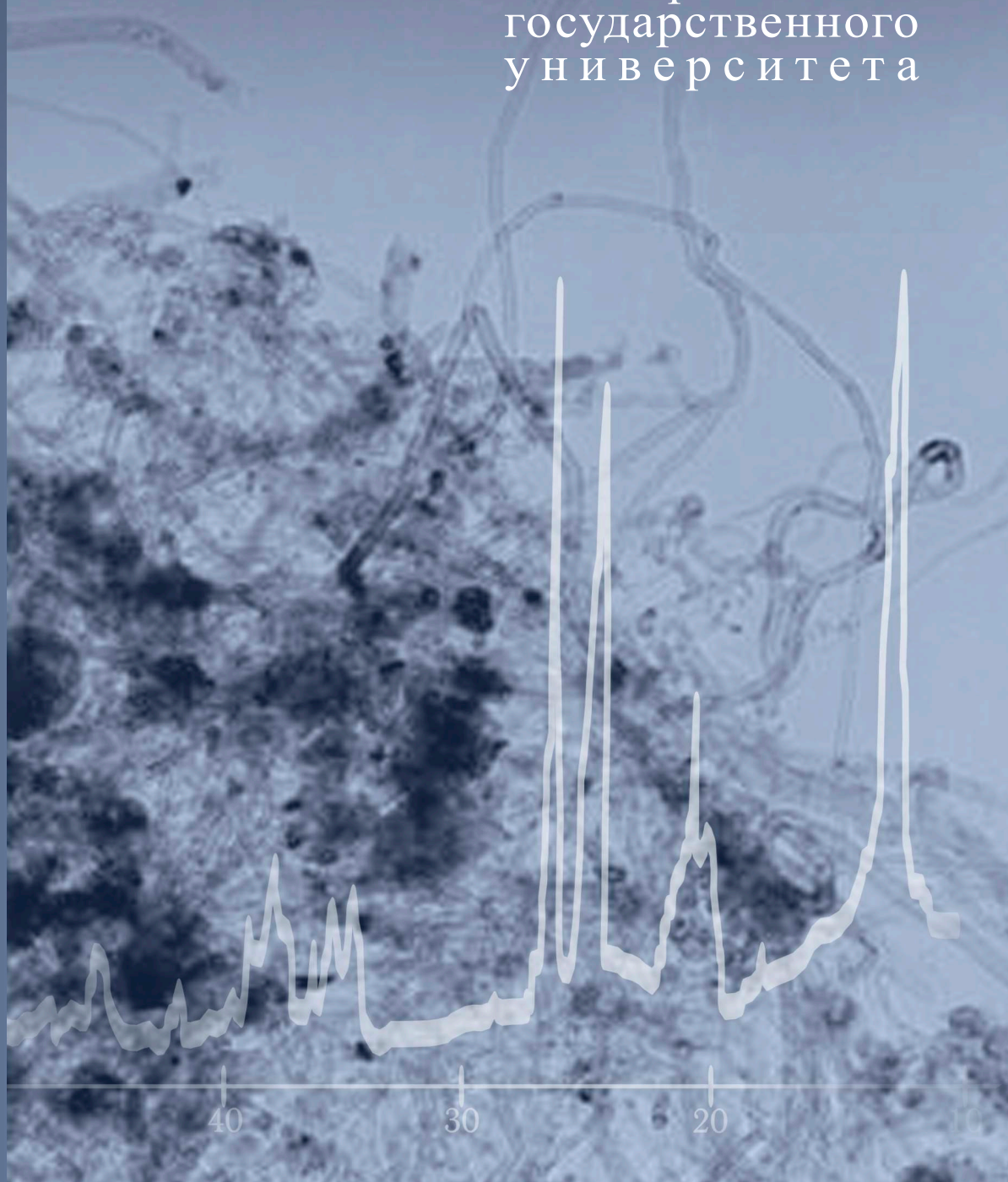
СЕРИЯ
ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИ

ВЕЛИКИЙ
НОВГОРОД

3(141)'2025

ВЕСТНИК

новгородского
государственного
университета





НОВГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА



НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2076-8052

Серия «Технические науки»

3 (141) ' 2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

ЕФРЕМЕНКОВ АНДРЕЙ БОРИСОВИЧ, д.т.н., доц.

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

ФИХТНЕР ОКСАНА АНАТОЛЬЕВНА, д.э.н., доц.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

БИЧУРИН М. И., д.ф.-м.н., проф.,

научный редактор (Великий Новгород, Россия)

ЗАХАРОВ А. Ю., д.ф.-м.н., проф.,

научный редактор (Великий Новгород, Россия)

ПЕТРОВ В. М., д.т.н., проф.,

ответственный секретарь (Великий Новгород, Россия)

АВЕРКИЕВ Н. С., д.ф.-м.н., проф.

(Санкт-Петербург, Россия)

БЫСТРОВ Н. Е., д.т.н., доцент,

(Великий Новгород, Россия)

ГАВРУШКО В. В., д.т.н., проф.

(Великий Новгород, Россия)

ЕДЕМСКИЙ В. А., д.ф.-м.н., доцент

(Великий Новгород, Россия)

ЗАВОРОТНЕВ Ю. Д., д.ф.-м.н., с.н.с.

(Донецк, Россия)

ЗАХАРОВ М. А., д.ф.-м.н., доцент

(Великий Новгород, Россия)

КАРТАШИНСКАЯ Е. С., д.хим.н. (Донецк, Россия)

МАЛАШЕНКО В. В., д.ф.-м.н., проф. (Донецк, Россия)

НЕМОВ С. А., д.ф.-м.н., проф.

(Санкт-Петербург, Россия)

ПЕТРОВ Р. В., д.ф.-м.н., доцент

(Великий Новгород, Россия)

РАССОЛОВ В. А., PhD., проф.

(Колумбия, США)

САМСОНОВ В. М., д.ф.-м.н., проф. (Тверь, Россия)

УЧАЙКИН В. В., д.ф.-м.н., проф. (Ульяновск, Россия)

ЭМИНОВ С. И., д.ф.-м.н., проф.

(Великий Новгород, Россия)

ВАН Я., PhD, проф. (Нанкин, Китай)

Учредитель и издатель –

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого»

Адрес издателя и редакции:

173003, Россия, Великий Новгород,
ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, ауд. 1308
Факс: +7(8162)974526; Тел.: +7(8162)338830
E-mail: vestnik@novsu.ru

<https://vestnovsu.elpub.ru/>

**ВЕСТНИК НОВГОРОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**
3 (141) ' 2025

Оригинал-макет подготовлен редакцией
журнала «Вестник НовГУ»
Верстка Т. С. Григорьева
Художественное оформление В. В. Попович
Дизайн обложки И. А. Чижикина

Свидетельство ПИ № 77-17766 от 10.03.2004
Министерства Российской Федерации
по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций

Периодичность: 4 номера в год

Подписано в печать 29.10.2025

Дата выхода 31.10.2025

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Тираж 500 экз. Усл. печ. л. 19,07. Уч.-изд. л. 7,80.
Свободная цена.

Отпечатано: ИП Волков А. Е.,
394086, Россия, Воронеж, ул. Любы Шевцовой, 34



(16+)

© Вестник НовГУ, 2025



EDITOR-IN-CHIEF

EFREMENKOV ANDREY B.,
Dr of Engineering, Assoc. Prof.

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

FIKHTNER OXANA A., Dr of Economics, Assoc. Prof.

EDITORIAL BOARD:

BICHURIN M. I., Dr of Physics and Mathematics, Prof.,
Science Editor (Veliky Novgorod, Russia)

ZAKHAROV A. Yu., Dr of Physics and Mathematics,
Prof., Science Editor (Veliky Novgorod, Russia)

PETROV V. M., Dr of Engineering, Prof., Executive
Editor (Veliky Novgorod, Russia)

AVERKIEV N. S., Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Saint Petersburg, Russia)

BYSTROV N. E., Dr of Engineering, Assoc. Prof.
(Veliky Novgorod, Russia)

GAVRUSHKO V. V., Dr of Engineering, Prof.
(Veliky Novgorod, Russia)

EDEMSKIY V. A., Dr of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof. (Veliky Novgorod, Russia)

ZAVOROTNEV Yu. D., Dr of Physics and Mathematics,
senior researcher (Donetsk, Russia)

ZAKHAROV M. A., Dr of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof. (Veliky Novgorod, Russia)

KARTASHYNSKAYA E. S., Dr of Chemistry
(Donetsk, Russia)

MALASHENKO V. V., Dr of Physics and Mathematics,
Prof. (Donetsk, Russia)

NEMOV S. A., Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Saint Petersburg, Russia)

PETROV R. V., Dr of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof. (Veliky Novgorod, Russia)

RASSOLOV V. A., PhD., Prof. (Columbia,
South Carolina, USA)

SAMSONOV V. M., Dr of Physics and Mathematics,
Prof. (Tver', Russia)

UCHAIKIN V. V., Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Ulyanovsk, Russia)

EMINOV S. I., Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Veliky Novgorod, Russia)

WANG YAOJIN, PhD, Prof. (Nankin, China)

Founder and Publisher – Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education
"Yaroslav-the-Wise Novgorod State University"

Postal address of Publisher and Editorial Staff:

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,
Russia, 173003, Veliky Novgorod,
ul. Bolshaya Sankt-Peterburgskaya, 41, room 1308
Fax: +7(8162)974526; Tel.: +7(8162)338830
E-mail: vestnik@novsu.ru

<https://vestnovsu.elpub.ru/>

VESTNIK OF NOVGOROD STATE UNIVERSITY
3 (141) ' 2025

Camera-ready copy is prepared by the journal
Vestnik NovSU Editorial Staff
Layout T. S. Grigoreva
Art work V. V. Popovich
Cover design I. A. Chizhikova

Printed publication license no. 77-17766
of 10 March, 2004, issued by Ministry
of the Russian Federation for Affairs of the Press,
Television and Radio Broadcasting and Mass
Communication Media

The journal is published quarterly.

Signed to print on 29.10.2025
Publication date 31.10.2025
Sheet size 60×84 1/8. Offset printing.
Number of printed copies: 500.
Conventionally printed sheet 19.07.
Free price.

Printed by IE Volkov A. E.
Russia, 394086, Voronezh, ul. Lyuby Shevcovoj, 34



(16+)
© Vestnik NovSU, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Обращение к читателям	365
-----------------------	-----

РАДИОФИЗИКА

Ивашева Е. Е., Соколов О. В., Бельшев А. А., Бичурин М. И. Магнитоэлектрический эффект в композитах с различными типами связности	367
---	-----

Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Компенсационные методы формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри-Перо	379
--	-----

Малашенко В. В. Немонотонная концентрационная зависимость динамического предела текучести облучённых металлов и сплавов	400
--	-----

ЭЛЕКТРОНИКА

Иванов В. С., Грачев Н. Н., Шеденко В. В. Алгоритм взлета и размещения роя БПЛА	408
--	-----

Михайлов В. Н. Обзор моделей удельной эффективной поверхности рассеяния морской поверхности при малых углах скольжения	422
---	-----

Сафаров А. Г., Бексеитова Г. К., Ганиев И. Н. Влияние добавок железа на теплоемкость и термодинамические функции алюминия марки А6	442
---	-----

Хаджийская Е. Ю., Покровская М. В. Разработка метода анализа данных в TDLAS-газоанализаторе	455
--	-----

Хомяков А. В., Логвинов С. С., Хомяков К. А., Лазин Ю. А. Когнитивные региональные системы контроля воздушного пространства	468
--	-----

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Бексеитова Г. К., Ганиев И. Н., Сафаров А. Г. Анодное поведение сплавов алюминия с кремнием в среде электролита NaCl	484
---	-----

<i>Беспалов Д. В., Голованова О. А. Лизинат и метионат цинка: синтез и расчет ИК спектров методом функционала плотности</i>	495
<i>Мисилин В. А., Кузьмин Е. В., Карпов М. М., Петров Р. В. Исследование магнитоэлектрического эффекта в структуре МЕТГЛАС/ЦТС в слабых магнитных полях</i>	506
<i>Эминов С. И., Сочилин А. В. Интегро-дифференциальное уравнение импедансной криволинейной вибраторной антенны</i>	514
<i>Требования к публикации статей в научном журнале «Вестник НовГУ»</i>	522

CONTENTS

<i>Address to readers</i>	365
---------------------------	-----

RADIOPHYSICS

<i>Ivasheva E. E., Sokolov O. V., Belyshev A. A., Bichurin M. I.</i> Magnetolectric effect in composites with different types of connectivity	367
<i>Kornyshev N. P., Serebryakov D. A.</i> Compensatory imaging methods in a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer	379
<i>Malashenko V. V.</i> Non-monotonic concentration dependence of the dynamic yield strength of irradiated metals and alloys	400

ELECTRONICS

<i>Ivanov V. S., Grachev N. N., Shedenko V. V.</i> Algorithm for takeoff and deployment of a UAV swarm	408
<i>Mikhailov V. N.</i> Review of the sea normalized radar reflectivity at low grazing angles	422
<i>Safarov A. G., Bekseitova G. K., Ganiev I. N.</i> Influence of iron additives on the heat capacity and thermodynamic properties of A6 aluminum	442
<i>Khadzhiyskaya E. Yu., Pokrovskaya M. V.</i> Development of a data analysis method in a TDLAS gas analyzer	455
<i>Khomyakov A. V., Logvinov S. S., Khomyakov K. A., Lazin Y. A.</i> Cognitive regional airspace surveillance and control systems	468

CONDENSED MATTER PHYSICS

<i>Bekseitova G. K., Ganiev I. N., Safarov A. G.</i> Anodic behavior of silicon-containing aluminum alloys in Na Cl electrolyte	484
<i>Bespalov D. V., Golovanova O. A.</i> Zinc lysinate and methionate: synthesis and IR spectrum calculation using the density functional theory method	495

<i>Misilin V. A., Kuzmin E. V., Karpov M. M., Petrov R. V. Study of the magnetoelectric effect in METGLAS/PZT structures under weak magnetic fields</i>	506
<i>Eminov S. I., Sochilin A. V. Integro-differential equation of an impedance curvilinear vibrator antenna</i>	514
<i>Requirements for publishing articles in the scientific journal "Vestnik NovSU"</i>	522

ОБРАЩЕНИЕ К ЧИТАТЕЛЯМ

Уважаемые читатели журнала «Вестник НовГУ»!

Представляем Вашему вниманию новый выпуск материалов по техническим направлениям наук научного журнала «Вестник НовГУ», в котором есть несколько интересных особенностей.

Во-первых, наша география авторов расширилась и приросла новыми учеными из Тулы и Душанбе (Республика Таджикистан), чьи исследования вызовут немало новых идей и перспективных разработок для части читательской аудитории нашего журнала. Авторы из Центрального конструкторского бюро аппаратостроения предложили новый взгляд на устройство единого радиолокационного поля на основе когнитивной архитектуры с интеграцией технологий искусственного интеллекта, что обеспечит устойчивую интеллектуальную систему воздушной безопасности нового поколения. Коллеги, представляющие Национальную академию наук Таджикистана, изучают использование алюминиево-кремниевых сплавов, которые позволяют повысить надёжность и долговечность авиационных конструкций, снизить риски коррозионного разрушения и, как следствие, обеспечить безопасность и эффективность эксплуатации летательных аппаратов. Результаты этих и других, не менее интересных исследований по радиофизике, электронике, физике конденсированного состояния учёных из Москвы, Санкт-Петербурга, Омска, Донецка, Великого Новгорода представлены на страницах этого выпуска.

Во-вторых, рады сообщить, что «Вестник Новгородского государственного университета» подтвердил свой статус высокорейтингового научного издания и был включен в Единый государственный перечень научных изданий (правопреемник «Белого списка» РАН) в соответствии с Протоколом Межведомственной рабочей группы Минобрнауки России № ДС/122-пр от 09.09.2025, что свидетельствует о высоком уровне редакционной подготовки статей, их научном качестве и соответствии международным издательским стандартам. Поздравляем всю издательскую команду журнала за их профессиональный труд и выражаем слова благодарности нашим авторам за уникальные и значимые разработки, которые были представлены на страницах нашего журнала. Эта победа вдохновляет на развитие и ставит перед нашей командой новые амбициозные задачи! Ждем ваши материалы по адресу электронной почты журнала vestnik@novsu.ru.

Главный редактор научного журнала «Вестник НовГУ»,
доктор технических наук

А. Б. Ефременков

ADDRESS TO READERS

Dear readers of Vestnik NovSU!

We are pleased to present the latest issue of the scientific journal Vestnik NovSU on the technical fields of sciences, featuring several noteworthy highlights.

First, our geographic range of authors has expanded, welcoming new researchers from Tula and Dushanbe (Republic of Tajikistan), whose studies are expected to inspire numerous new ideas and promising developments for a portion of our readership. Authors from the Central Design Bureau of Machine Building proposed a novel approach to creating a unified radar field based on a cognitive architecture integrated with artificial intelligence technologies, aiming to establish a next-generation intelligent air security system. Meanwhile, colleagues from the National Academy of Sciences of Tajikistan are investigating aluminum-silicon alloys that enhance the reliability and durability of aviation structures, reduce the risk of corrosion, and consequently ensure the safety and efficiency of aircraft operation. The results of these and other equally compelling studies in radiophysics, electronics, and condensed matter physics, conducted by researchers from Moscow, Saint Petersburg, Omsk, Donetsk, and Veliky Novgorod, are presented in this issue.

Second, we are pleased to announce that Vestnik of Novgorod State University has confirmed its status as a high-ranking scientific publication and has been included in the Unified State List of Scientific Publications (successor to the “White List” of the Russian Academy of Sciences) in accordance with Protocol № DS/122-pr of the Interdepartmental Working Group of the Ministry of Science and Higher Education of Russia dated 09.09.2025. This recognition reflects the high level of editorial preparation, scientific quality, and compliance with international publishing standards. We congratulate the entire editorial team for their professional efforts and express our gratitude to our authors for their unique and significant contributions published in the journal. This achievement inspires further development and sets ambitious new goals for our team. We look forward to receiving your submissions at the journal’s email address: vestnik@novsu.ru.

Chief Editor of the scientific journal “Vestnik NovSU”,
Doctor of Engineering

Andrey Efremenko

РАДИОФИЗИКА

УДК 53.098:537.226.86:621.31

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).367-378

Поступила в редакцию / Received 25.07.2025

ГРНТИ 29.19.37+47.59,45+55.09.43

Специальность ВАК 1.3.4.; 1.3.8.

Принята к публикации / Accepted 24.09.2025

Научная статья

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КОМПОЗИТАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ СВЯЗНОСТИ

Ивашева Е. Е., Соколов О. В., Бelyшев А. А., Бичурин М. И.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация. В статье рассмотрены экспериментальные результаты по исследованию магнитоэлектрического эффекта в композитах с различными типами связностей. Представлен широкий спектр исследованных магнитоэлектрических композитов как по форме от макро- до наноструктур, так и по составу материалов. Цель обзора и дальнейших исследований в этом направлении состоит в установлении сложной зависимости величины магнитоэлектрического эффекта от типа связности. Кроме использования данных исследования по магнитоэлектрическим структурам со связностями типа 0–3 и 3–0; 1–1, 2–1 и 3–1, потребуется проведение аналитических расчетов и моделирования в среде Comsol Multiphysics магнитоэлектрических коэффициентов для этих структур. Совокупность полученных результатов позволит найти зависимость величины магнитоэлектрического взаимодействия в композитах от материальных параметров и их типа связности.

Ключевые слова: *пьезоэлектричество, магнитострикция, магнитоэлектрический эффект, связность, магнитоэлектрический композит*

Для цитирования: Ивашева Е. Е., Соколов О. В., Бelyшев А. А., Бичурин М. И. Магнитоэлектрический эффект в композитах с различными типами связности // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 367–378. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).367-378

Research Article

MAGNETOELECTRIC EFFECT IN COMPOSITES WITH DIFFERENT CONNECTIVITY TYPES

Ivasheva E. E., Sokolov O. V., Belyshev A. A., Bichurin M. I.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract. This article reviews experimental results from studies of the magnetoelectric effect in composites with various connectivity types. A wide range of studied magnetoelectric composites is presented, both in terms of shape, from macro- to nanostructures, and in terms of material composition. The objective of this review and further research in this area is to establish the complex dependence of the magnetoelectric effect magnitude on the connectivity type. In addition to using the review data on magnetoelectric structures with 0–3 and 3–0; 1–1, 2–1, and 3–1 connectivity types, analytical calculations and modeling of the magnetoelectric coefficients for these structures in the Comsol Multiphysics software will be required. The combination of the obtained results will allow us to find the dependence of the magnetoelectric interaction magnitude in composites on the material parameters and their connectivity type.

Keywords: *piezoelectricity, magnetostriction, magnetoelectric effect, connectivity, magnetoelectric composite*

For citation: Ivasheva E. E., Sokolov O. V., Belyshev A. A., Bichurin M. I. Magnetoelectric effect in composites with different connectivity types // Vestnik NovSU. 3 (141). 367–378. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).367-378

Введение

Магнитоэлектрические (МЭ) композиты представляют собой перспективный класс материалов, объединяющих ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) фазы. Такие структуры, в которых проявляется МЭ эффект, позволяют реализовывать взаимное изменение магнитных и электрических свойств через механическое взаимодействие. Такой эффект открывает широкие возможности для разработки, например датчиков магнитных и электрических полей, систем сбора энергии (харвестеров), гираторов, различных биомедицинских устройств и т.п.

В настоящее время в области магнитоэлектроники наблюдается значительный прогресс в разработке МЭ композитов. Одним из ключевых параметров, который определяет эффективность МЭ взаимодействия, является тип связности структуры, характеризующий пространственное распределение и взаимное соединение фаз. Каждый тип связности обладает уникальными особенностями передачи механических деформаций, что существенно влияет на величину МЭ отклика, технологичность и практическую применимость материала. Несмотря на огромные достижения в разработке разнообразных МЭ структур, исследователями практически не затрагивается проблема систематизации данных о влиянии типов связности на их функциональные свойства.

В данной работе рассматриваются основные виды связности в МЭ композитах, обсуждаются их преимущества и ограничения, а также освещаются перспективные направления модификации структур для усиления МЭ эффекта. Особое внимание уделяется взаимосвязи между морфологией композита и его функциональными характеристиками, что важно для целенаправленной разработки МЭ структур с заданными свойствами.

Типы связности композитов

Тип связности композита – это характеристика, которая указывает, вдоль какого числа осей прямоугольной системы координат непрерывно распределяется конкретная фаза композита.

Наиболее распространенная в настоящее время классификация композитов по типам связности была предложена в [1, 2] и др. Для структур, состоящих из двух фаз, существует десять связностей: 0–0, 1–0, 2–0, 3–0, 1–1, 2–1, 3–1, 2–2, 3–2 и 3–3. В данном случае цифры указывают, в каком количестве измерений каждая из фаз является самосвязанной, т. е. связанной сама с собой: 0 – фаза изолирована, 1 – фаза самосвязана в одном измерении, 2 – в двух измерениях и 3 – в трех измерениях.

На рисунке 1 схематично изображены различные типы связности твердого тела, состоящего из двух фаз. Стрелки указывают направление связи. Для пояснения рассмотрим, например, связность типа 3–1: заштрихованная фаза трехмерно самосвязана, а незаштрихованная – одномерно.

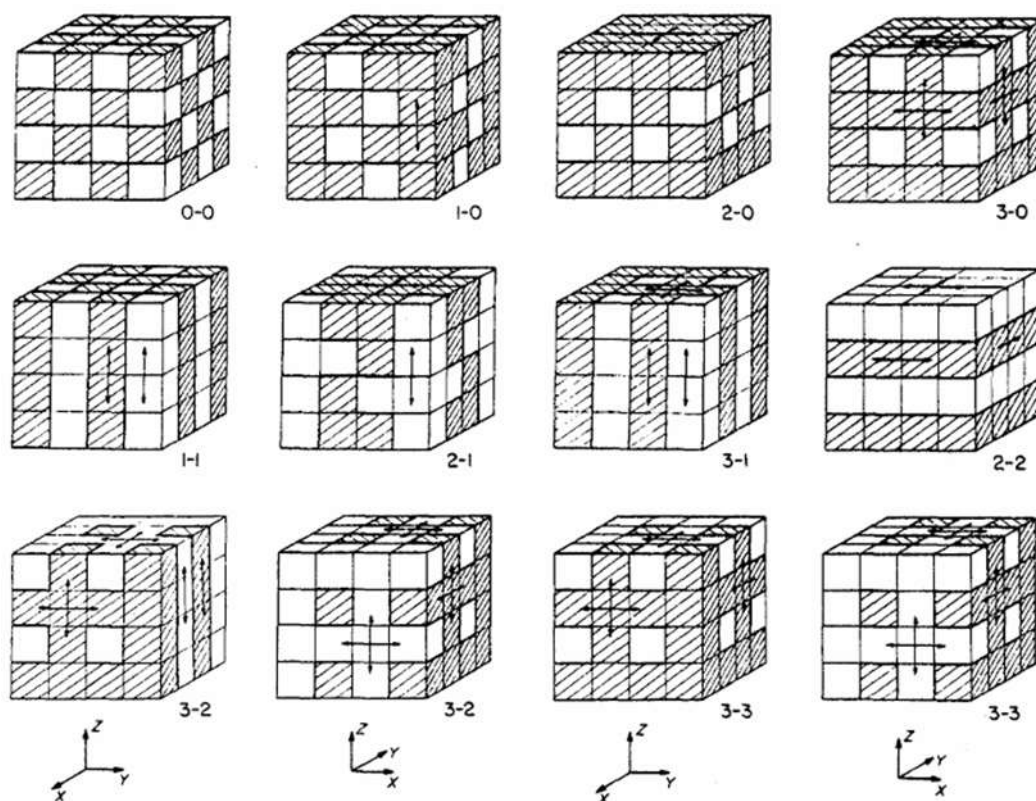


Рисунок 1. Схематичное представление десяти типов связности для двухфазного твердого тела [1]

В работе [1] дан обзор экспериментальных результатов по исследованию МЭ эффекта в композитах с различными типами связностей. Цель обзора и дальнейших исследований в этом направлении состоит в установлении зависимости величины МЭ эффекта от типа связности. Использование данных обзора по МЭ структурам с различными типами связностей позволит в дальнейшем найти зависимость величины МЭ взаимодействия в композитах от материальных параметров и их типа связности.

Основная часть

Экспериментальное и теоретическое изучение МЭ эффекта в композитах с различными типами связности уже довольно давно ведется большим кругом исследователей. Так, например, в статье [3] приведены результаты расчета МЭ эффекта в композитах с типами связности 3–0 и 0–3 из различных пьезоэлектрических и магнитострикционных материалов.

В исследовании [4] приводятся теоретические и экспериментальные результаты, полученные для МЭ структур с 2–2, 3–0 и 0–3 типами связности. В качестве ПЭ фазы использовались BaTiO_3 , PZT–4, PZT–5A, PZT–5H и PZT–8, а в качестве ФМ фазы – CoFe_2O_4 . В ходе экспериментальных работ было выявлено, что в слоистых (2–2) структурах МЭ эффект значительно больше, чем в смешанных

(3–0 и 0–3). Так, например, наибольший МЭ коэффициент α был получен в композите CoFe_2O_4 / PZT-4 и составил $73,9 \times 10^{-3}$ В/(см·Э), а для смесевой структуры максимальный α был достигнут в CoFe_2O_4 / BaTiO_3 (80:20 мол. %) и был равен $7,6 \times 10^{-3}$ В/(см·Э). При этом авторами было отмечено, что α увеличивается с повышением объемной доли ФМ в композитах типа 3–0 с ПЭ фазой, где пьезоэлектрик самосвязан в трех измерениях. Это связано с тем, что диэлектрическая проницаемость феррита как минимум на два порядка меньше, чем у пьезоэлектрической фазы. Однако, такого явления не наблюдается в композитах типа 0–3, где уже пьезомагнитная фаза самосвязана в трех измерениях. Максимальный МЭ эффект в таком случае достигается при объемной концентрации 50:50, поскольку коэффициенты податливости двух фаз имеют сопоставимые величины.

Расчет линейного МЭ эффекта в двухфазных композитах с типами связности 2–2 и 0–3 был представлен в публикации [5], которая посвящена теоретическому определению предельных концентраций компонентов, обеспечивающих максимальную МЭ чувствительность.

В работе [6] исследовали МЭ структуры состава CoFe_2O_4 / $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ с разным соотношением фаз с тремя типами связности: 0–3, 3–3 и 1–3. На рисунке 2 представлены результаты исследования наноструктур. Во всех случаях изменение МЭ отклика в зависимости от величины поля смещения H_{Bias} оказалось различным, при этом наибольшее значение α было получено в структуре с типом связности 1–3 и достигло 390×10^{-3} В/(см·Э) вблизи $H_{\text{Bias}} = 0$.

Другим исследованием, посвященным изучению МЭ композита с типом связности 1–3 является работа [7]. В ней рассматривается структура со стержнем PZT и матрицей Terfenol-D с эпоксидной смолой (TDE). Эпоксидная смола в данном случае является изолирующей матрицей, в которой частицы Terfenol-D равномерно распределены и изолированы друг от друга. На рисунке 3 представлен график частотной зависимости МЭ коэффициента для стержневого композита PZT / TDE. Продольный α был более значительным по сравнению с поперечным, и достигал $18,2$ В/(см·Э).

Статья [8] посвящена исследованию МЭ наноструктур «волокну-оболочка» BaTiO_3 / CoFe_2O_4 , имеющих тип связности 3–1. При этом структуры рассматривались в свободном виде, а также связанные с подложкой. В результате максимальный МЭ эффект был получен в свободном композите и в таком случае α составил 35 В/(см·Э). В случае с подложкой $\alpha = 12$ В/(см·Э).

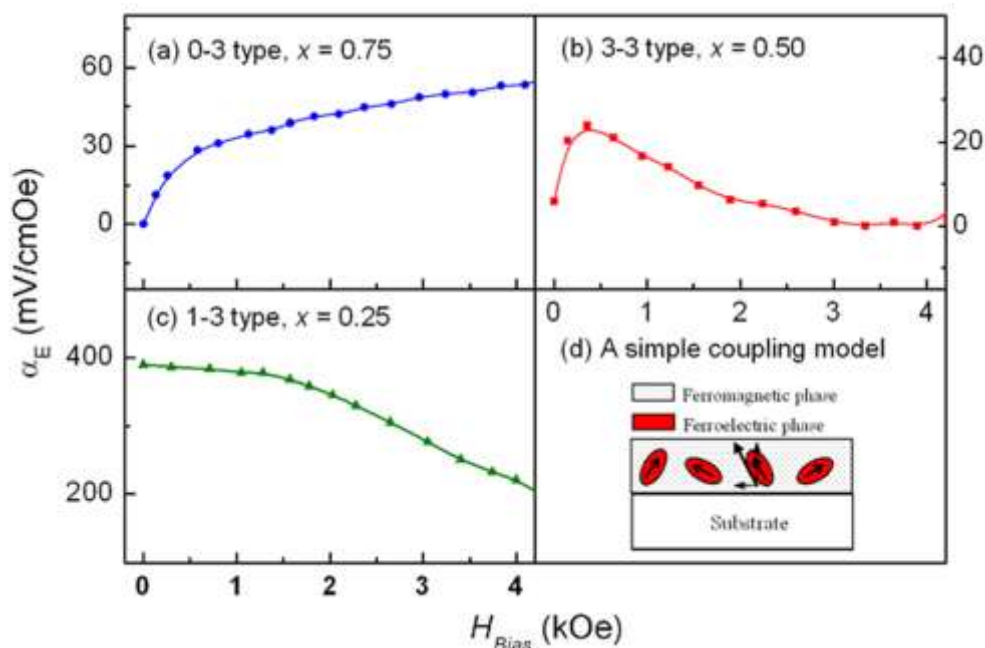


Рисунок 2. Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от поля смещения при частоте переменного магнитного поля $f = 10$ кГц для композитных МЭ нанопленок с различным объемным содержанием: (a) $x = 0,75$; (b) $x = 0,50$; (c) $x = 0,25$; (d) схематичная иллюстрация взаимодействия между сегнетоэлектрической и ФМ фазами [6]

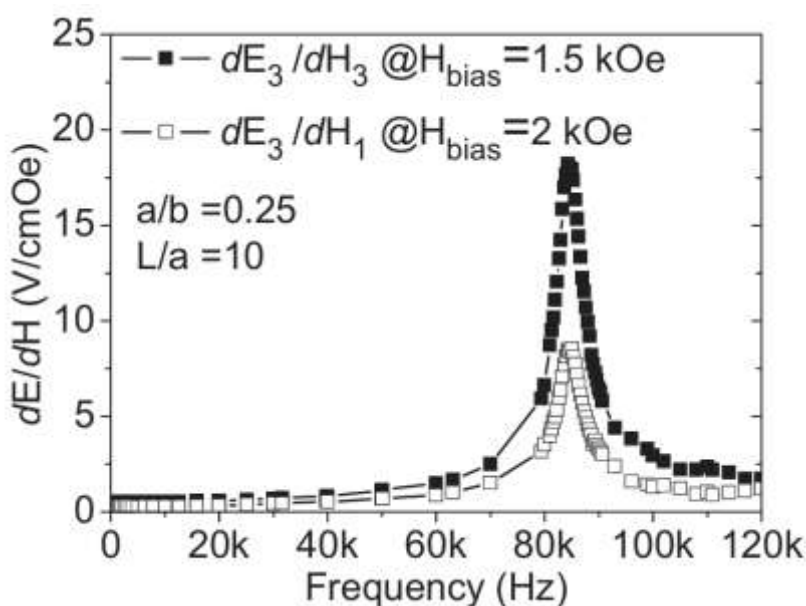


Рисунок 3. Частотная зависимость МЭ коэффициента для структуры PZT / TDE с типом связности 1–3 [7]

Также проводилось исследование, посвященное структуре с типом связности 3–1 (или «псевдо» 3–0–1), где в качестве стержней был использован CoFe_2O_4 с эпоксидной смолой, которая выступала в качестве электрической изоляции для предотвращения токов утечки, а в качестве матрицы – PZT [9].

На рисунке 4 приводятся результаты исследования МЭ структуры при различных содержаниях объемной доли PZT: 0,40; 0,43 и 0,51. Наибольший МЭ эффект наблюдался в случае с массовой долей CoFe_2O_4 , равной 0,2, и объемной долей PZT, равной 0,51, при этом максимальный $\alpha = 2,2 \times 10^{-3} \text{ В/}(\text{см}\cdot\text{Э})$.

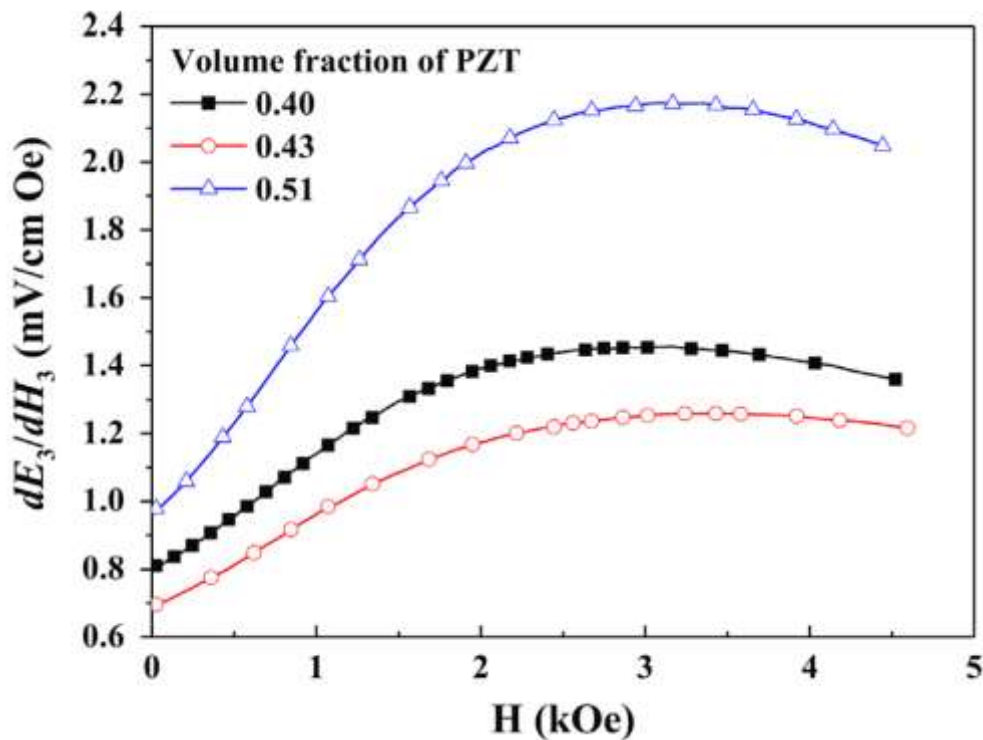


Рисунок 4. Зависимость МЭ коэффициента от величины постоянного магнитного поля при $f = 100$ Гц в композите с типом связности «псевдо» 3–0–1 с различными объемными долями PZT [9]

В работе [10] были исследованы МЭ композиты $\text{P(VDF-TrFE)} / \text{CoFe}_2\text{O}_4$ с массовой долей наночастиц CoFe_2O_4 от 5 до 30% и при этом имели тип связности 0–3. Полученные авторами результаты представлены на рисунке 5. Наибольший МЭ отклик был достигнут на структуре с массовой долей CoFe_2O_4 20% и был равен $47,1 \times 10^{-3} \text{ В/}(\text{см}\cdot\text{Э})$ на резонансной частоте. При этом в данном композите также наблюдается самосмещенный МЭ эффект, который проявляется в создании внутреннего магнитного поля смещения в МЭ композите в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля. Величина МЭ коэффициента составила $20 \times 10^{-3} \text{ В/}(\text{см}\cdot\text{Э})$.

Статья [11] посвящена изучению МЭ эффекта в структурах $\text{NiFe}_2\text{O}_4 / \text{PZT}$ с типом связности 3–0. На рисунке 6 приведен график зависимости МЭ коэффициента от частоты переменного магнитного поля для композита $x\text{NiFe}_2\text{O}_4 / (1-x)\text{PZT}$ с содержанием x : 0,10; 0,25; 0,35; 0,40 и 0,50. Наибольший α достиг значения $28,5 \text{ В/}(\text{см}\cdot\text{Э})$ на частоте резонанса приблизительно 287 кГц в структуре $0,35\text{NiFe}_2\text{O}_4 / 0,65\text{PZT}$.

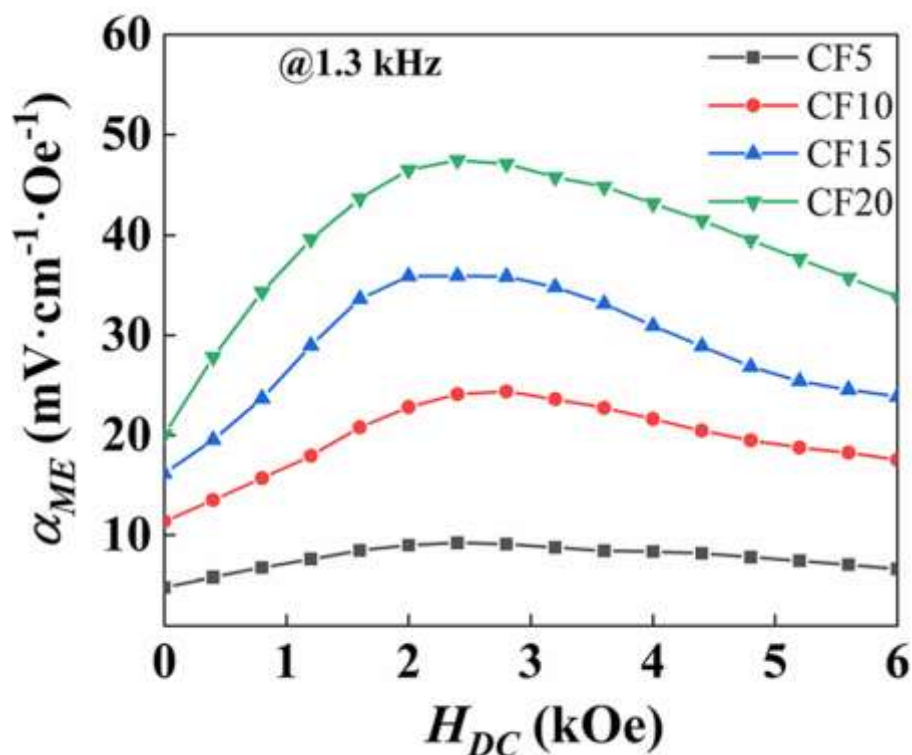


Рисунок 5. График зависимости МЭ коэффициента от постоянного магнитного поля нанокompозитов P(VDF-TrFE) / CoFe_2O_4 с различным содержанием ФМ фазы [10]

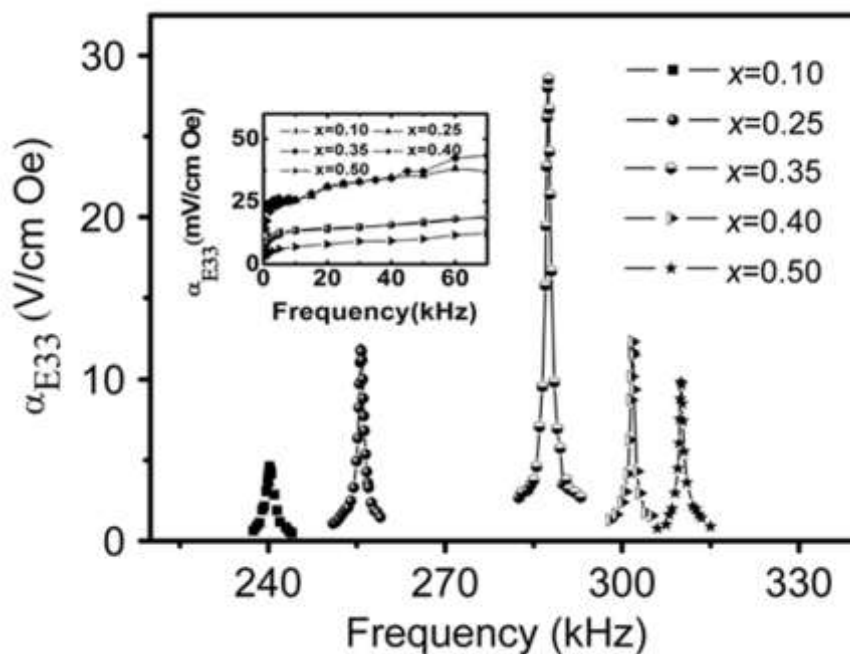


Рисунок 6. График зависимости МЭ коэффициента от частоты для структуры $x\text{NiFe}_2\text{O}_4 / (1-x)\text{PZT}$ с типом связности 3–0 и различным содержанием x [11]

В исследовании [12], посвященном МЭ композиту с типом связности 2–1, рассматривалась структура, состоящая из волокнистой пьезоэлектрической фазы PZT–5A, с двух сторон которой располагаются пластины Metglas. На рисунке 7 представлены графики, из которых видно полученное высокое значение $\alpha \approx 500$ В/(см·Э) на резонансной частоте и при этом в квазистатическом диапазоне частот α превысил значение 20 В/(см·Э).

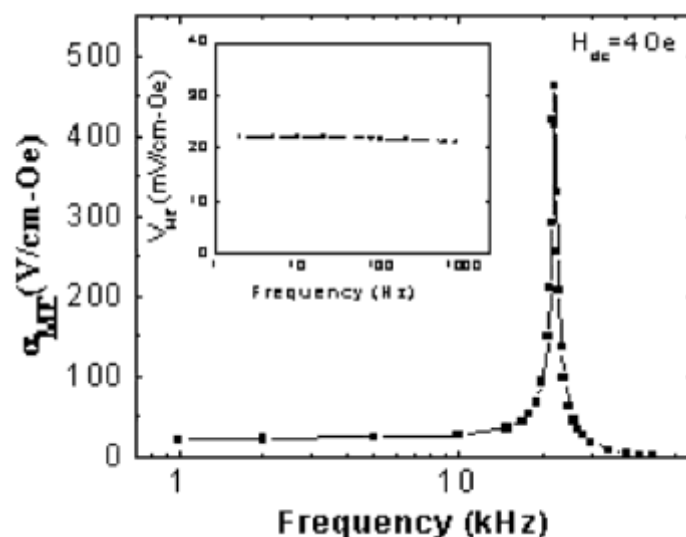


Рисунок 7. Зависимость МЭ коэффициента композита Metglas / PZT-5A / Metglas от частоты. На вставке приведен МЭ отклик в квазистатическом диапазоне частот [12]

В статье [13] рассматриваются две МЭ структуры с типом связности 2–1 – Metglas / PZT / Metglas и Metglas / PMN–PT / Metglas, при этом пьезоэлектрический материал в обоих случаях был в виде волокон, а Metglas – в форме пластин. Наибольший МЭ коэффициент, как видно из рисунка 8, был получен в композите с использованием волокон PMN–PT, и равнялся приблизительно 1100 В/(см·Э). Это значение превышало значение α в структуре с PZT почти в 3 раза. Также авторы исследовали данные структуры в качестве датчиков постоянного магнитного поля H_{dc} . На структуре с использованием PZT была получена чувствительность к $H_{dc} = 15$ нТл на частоте $f = 1$ кГц и при переменном магнитном поле $H_{ac} = 0,1$ Э. На МЭ композите с пьезоэлектрическими волокнами из PMN-PT были получены более лучшие результаты – $H_{dc} = 5$ нТл при $f = 10$ кГц и $H_{ac} = 0,1$ Э.

В статье [14] авторы исследуют слоистый МЭ нанокompозит BaTiO₃ / CoFe / BaTiO₃ с типом связности 2–2. На рисунке 9 показана полученная зависимость α от частоты в слоистой наноструктуре типа связности 2–2. Данные свидетельствуют о большом значении $\alpha = 944$ В/(см·Э) на частоте резонанса в поперечном режиме.

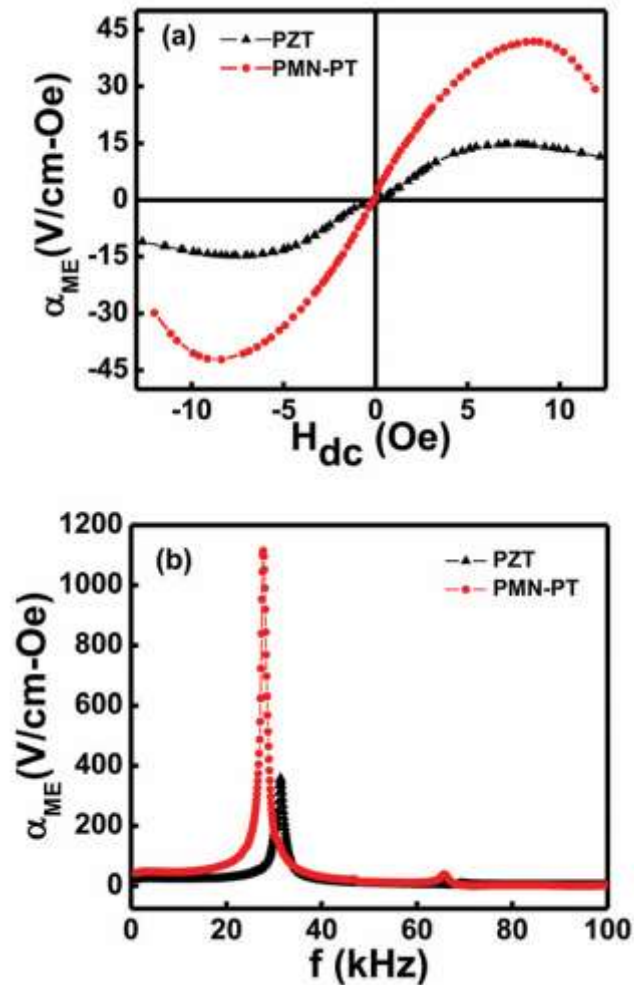


Рисунок 8. МЭ коэффициент по напряжению композитов Metglas / PZT / Metglas и Metglas / PMN-PT / Metglas с типом связности 2-1 как функция: (а) постоянного смещения H_{dc} при $f = 1$ кГц, (б) частоты переменного магнитного поля [13]

Исследование [15] посвящено изучению МЭ эффекта в одномерной структуре с типом связности 1–1. В данной работе МЭ композит состоял из одного тонкого волокна монокристалла PMN-PT [011] и пяти расположенных с каждой стороны кристалла волокон аморфного сплава Metglas, обработанного лазером. Такая структура с дополнительной лазерной обработкой Metglas показала огромное значение МЭ коэффициента, равное 7000 В/(см·Э) на частоте резонанса. Помимо этого, исследователями была отмечена высокая чувствительность к изменению магнитного поля рассматриваемого МЭ композита – выходной сигнал МЭ напряжения был обнаружен при величине переменного магнитного поля $1,35 \times 10^{-13}$ Тл.

Недавней работой является обзор [16], в котором рассматриваются исследования по синтезу и измерениям МЭ-эффекта в микро- и нановолокнистых композитах типа «ядро–оболочка». Также приводятся данные по величине МЭ коэффициента в структурах с типами связности 0–3, 2–2 и 1–1.

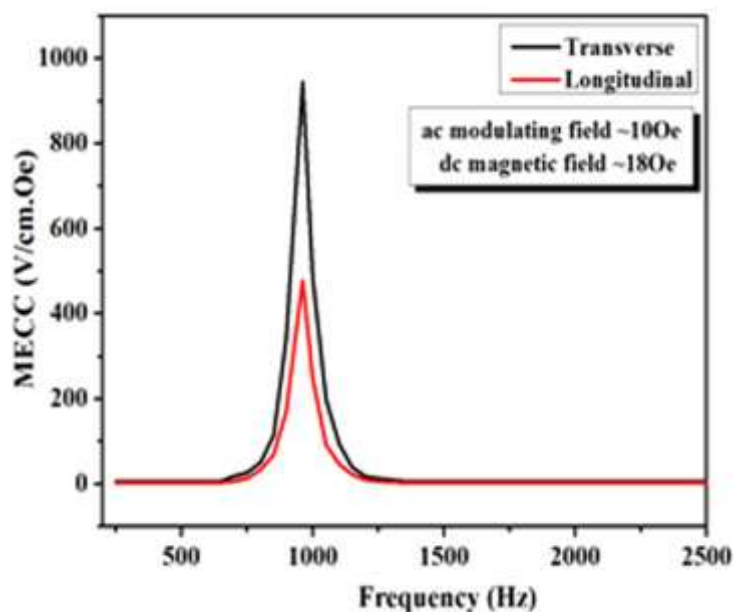


Рисунок 9. Зависимость МЭ коэффициента от частоты для наноструктуры BaTiO₃ / CoFe / BaTiO₃ с типом связности 2–2 в поперечном и продольном режимах [14]

С целью удобства анализа влияния связности МЭ структур на величину МЭ эффекта приведенные экспериментальные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. МЭ коэффициент α в МЭ структурах с различными типами связностей

Тип связности	Структура	α , В/(см·Э)	Источник информации
3–0	BaTiO ₃ / CoFe ₂ O ₄	$7,6 \times 10^{-3}$	[4]
0–3	CoFe ₂ O ₄ / PZT	30×10^{-3}	[6]
0–3	P(VDF-TrFE) / CoFe ₂ O ₄	$47,1 \times 10^{-3}$	[10]
3–0	NiFe ₂ O ₄ / PZT	28,5	[11]
1–3	CoFe ₂ O ₄ / PZT	390×10^{-3}	[6]
1–3	PZT / TDE	18,2	[7]
3–1	BaTiO ₃ / CoFe ₂ O ₄	35	[8]
3–1	PZT / CoFe ₂ O ₄ / Epoxy	$2,2 \times 10^{-3}$	[9]
2–1	Metglas / PZT-5A / Metglas	500	[12]
2–1	Metglas / PMN-PT / Metglas	1100	[13]
2–1	Metglas / PZT / Metglas	390	[13]
1–1	Metglas / PMN-PT / Metglas	7000	[15]
2–2	PZT-4 / CoFe ₂ O ₄	$73,9 \times 10^{-3}$	[4]
2–2	BaTiO ₃ / CoFe / BaTiO ₃	944	[14]
3–3	CoFe ₂ O ₄ / PZT	25×10^{-3}	[6]

Результаты таблицы 1 наглядно показывают, что наиболее перспективны для дальнейшего анализа МЭ структуры со связностями типа 0–3 и 3–0; 1–1, 2–1 и 3–1.

Заключение

Связность – это один из ключевых аспектов при разработке МЭ композитов, поскольку МЭ отклик структуры может изменяться на несколько порядков в зависимости от способа соединения фаз. Проведенный авторами анализ данных показывает, что использование результатов по МЭ структурам со связностями типа 0–3 и 3–0; 1–1, 2–1 и 3–1 с учетом детальных расчетов МЭ коэффициентов позволит найти зависимость величины МЭ взаимодействия в композитах от материальных параметров и их типа связности. При этом в любых МЭ композитах необходимо стремиться к снижению пористости, любых примесей или нежелательных фаз, образовавшихся во время синтеза, которые заметно влияют на качество МЭ связи.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 24-15-20044. <https://rscf.ru/project/24-15-20044/>

Список литературы / References

1. Newnham R. E., Skinner D. P., Cross L. E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites // *Materials research bulletin*. 1978. 13 (5). 525–536. DOI: 10.1016/0025-5408(78)90161-7
2. Newnham R. E. *Properties of materials: anisotropy, symmetry, structure*. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 43–87.
3. Harshe G., Dougherty J. P., Newnham R. E. Theoretical modelling of 3-0/0-3 magnetoelectric composites // *International journal of applied electromagnetics in materials*. 1993. 4 (2). 161–171. DOI: 10.1177/138354169300400211
4. Harshe G., Dougherty J. P., Newnham R. E. Magnetoelectric effect in composite materials // *Mathematics in smart structures*. 1993. 1919. 224–235. DOI: 10.1117/12.148414
5. Getman I. Magnetoelectric composite materials: theoretical approach to determine their properties // *Ferroelectrics*. 1994. 162 (1). 45–50. DOI: 10.1080/00150199408245089
6. Wan J., Weng Y., Wu Y., Li Z., Liu J.-M., Guanghou W. Controllable phase connectivity and magnetoelectric coupling behavior in CoFe₂O₄Pb(Zr,Ti)O₃ nanostructured films // *Nanotechnology*. 2007. 18 (46). 465708. DOI: 10.1088/0957-4484/18/46/465708
7. Ma J., Shi Z., Nan C.-W. Magnetoelectric properties of composites of single Pb(Zr,Ti)O₃ rods and Terfenol-D/Epoxy with a single-period of 1-3-Type structure // *Advanced materials*. 2007. 19. 2571–2573. DOI: 10.1002/adma.200700330
8. Fu B., Lu R., Gao K. Substrate clamping effect onto magnetoelectric coupling in multiferroic BaTiO₃-CoFe₂O₄ core-shell nanofibers via coaxial electrospinning // *Europhysics letters*. 2015. 112 (2). 27002. DOI: 10.1209/0295-5075/112/27002
9. Xu T., Wang C.-A., Wang C. Synthesis and magnetoelectric effect of composites with CoFe₂O₄-epoxy embedded in 3–1 type porous PZT ceramics // *Ceramics international*. 2015. 41 (9). 11080–11085. DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2015.05.054

10. Mu X., Zhang H., Zhang C. et al. Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene)/cobalt ferrite composite films with a self-biased magnetoelectric effect for flexible AC magnetic sensors // Journal of materials science. 2021. 56 (16). 9728–9740. DOI: 10.1007/s10853-021-05937-8
11. Wu D., Gong W., Deng H., Li M. Magnetoelectric composite ceramics of nickel ferrite and lead zirconate titanate via in situ processing // Journal of physics D: applied physics. 2007. 40 (16). 5002. DOI: 10.1088/0022-3727/40/16/037
12. Dong S., Zhai J., Li J., Viehland D. Near-ideal magnetoelectricity in high-permeability magnetostrictive/piezofiber laminates with a (2-1) connectivity // Applied physics letters. 2006. 89. 252904. DOI: 10.1063/1.2420772
13. Gao J., Shen L., Wang Y., Gray D., Li J., Viehland D. Enhanced sensitivity to direct current magnetic field changes in Metglas/Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃–PbTiO₃ laminates // Journal of applied physics. 2011. 109 (7). 074507. DOI: 10.1063/1.3569629
14. Nair S. S., Pookat G., Saravanan V., Anantharaman M. R. Lead free heterogeneous multilayers with giant magneto electric coupling for microelectronics/microelectromechanical systems applications // Journal of applied physics. 2013. 114 (6). 064309. DOI: 10.1063/1.4818411
15. Chu Z., Shi H., Shi W., Liu G., Wu J., Yang J., Dong S. Enhanced Resonance Magnetoelectric Coupling in (1-1) Connectivity Composites // Advanced Materials. 2017. 29 (19). 1606022. DOI: 10.1002/adma.201606022
16. Saha S., Acharya S., Liu Y., Page M.R., Srinivasan G. Review of Magnetoelectric Effects on Coaxial Fibers of Ferrites and Ferroelectrics // Applied sciences. 2025. 15 (9). 5162. DOI: 10.3390/app15095162

Информация об авторах

Ивашева Елена Евгеньевна – магистрант, инженер-исследователь, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-4492-4137, s246709@std.novsu.ru

Соколов Олег Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-3041-9537, o-v-sokolov@mail.ru

Белышев Андрей Александрович – аспирант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-3152-6551, diskord@list.ru

Бичурин Мирза Имамович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-0650-4712, Mirza.Bichurin@novsu.ru

РАДИОФИЗИКА

УДК 681.787.6:621.383

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).379-399

Поступила в редакцию / Received 19.07.2025

ГРНТИ 29.31.29+44.41.35

Специальность ВАК 1.3.4.; 2.2.13.

Принята к публикации / Accepted 16.09.2025

Научная статья

КОМПЕНСАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА БАЗЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

Корнышев Н. П., Серебряков Д. А.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы построения гиперспектральных систем на базе интерферометра Фабри-Перо с использованием черно-белого матричного фотоприемника, регистрирующего сигналы изображений в процессе сканирования заданного спектрального диапазона. Описываются методы формирования изображений, основанные на предварительном сканировании заданного диапазона спектра, запоминании получаемых изображений и их вычитании из изображений, получаемых при текущем сканировании. Производится оценка выигрыша, заключающегося в расширении диапазона спектрального сканирования в одномодовом режиме. Детально рассматриваются параметры сканирования для нескольких вариантов реализации процесса компенсации с использованием различных порядков интерференции и обсуждаются результаты их компьютерного моделирования, а также даются рекомендации по применению. В статье подробно рассматриваются параметры сканирования спектрального диапазона. Приводятся соответствующие формулы, таблицы и иллюстрации, показывающие последовательность получения изображений для компенсации дополнительных мод, появляющихся в процессе сканирования.

Ключевые слова: гиперспектральные системы, интерферометр Фабри-Перо, матричный фотоприемник

Для цитирования: Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Компенсационные методы формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри-Перо // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 379–399. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).379-399

Research Article

COMPENSATORY IMAGING METHODS IN A HYPERSPECTRAL SYSTEM BASED ON THE FABRY-PEROT INTERFEROMETER

Kornyshev N. P., Serebryakov D. A.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract. The article discusses the construction of hyperspectral systems based on the Fabry-Perot interferometer using a black-and-white matrix sensor that registers image signals during scanning of a given spectral range. Image generation methods based on preliminary scanning of a given range of the spectrum, storing the resulting images and subtracting these images from the images obtained during the current scan are described. The gain is estimated, which consists in expanding the range of spectral scanning in single-mode mode. The scanning parameters for several variants of the compensation process using different interference orders are considered in detail, and the results of their computer simulation are discussed, as well as recommendations for their application. The article discusses in detail the parameters of scanning the spectral range.

The corresponding formulas, tables, and illustrations are provided, showing the sequence of image acquisition to compensate for additional modes that appear during the scanning process.

Keywords: *hyperspectral systems, Fabry-Perot interferometer, matrix sensor*

For citation: Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Compensatory imaging methods in a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 379–399. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).379-399

Введение

Гиперспектральные системы (ГСС) со спектральным сканированием на основе интерферометра Фабри-Перо (ФПИ) обладают рядом достоинств, в частности малыми габаритами и удобством выбора узких зон регистрации путем электрического управления размером воздушного зазора при помощи пьезоактюаторов [1–2].

Случай, когда при каждом шаге сканировании осуществляется фиксация изображения, соответствующего единственной узкой зоне регистрации, формируемой ФПИ (одномодовое сканирование), является наиболее простым для реализации [3–5]. Кроме простоты данный режим работы ГСС на ФПИ обеспечивает более высокую контрастную чувствительность по сравнению с многомодовым сканированием с фиксацией изображений от соответствующих мод в соответствующих каналах многосигнального фотоприемника (в частном случае цветного RGB фотоприемника), поскольку достичь потенциального так называемого выигрыша Фелджета [6, 7], который обеспечивал бы одинаковую контрастную чувствительность при одно- и многомодовом сканировании, практически не удастся из-за изменения расстояния между модами в процессе сканирования.

Диапазон сканирования $\Delta\lambda = [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ в одномодовом режиме работы ограничивается расстоянием между смежными модами, соответствующими порядкам интерференции m и $m+1$.

Увеличить диапазон сканирования можно, в частности, за счет комбинирования ФПИ и светофильтров с широкими зонами регистрации, отсекающими участки диапазона с дополнительными модами высших порядков интерференции [2].

Альтернативными методами, позволяющими расширить диапазон сканирования, являются рассматриваемые в настоящей статье компенсационные методы [8], заключающиеся в предварительном его сканировании и запоминании изображений от дополнительных (компенсируемых) мод, которые при информативном сканировании на основной (сканирующей) моде вычитаются из регистрируемых изображений.

Целью настоящей статьи является рассмотрение результатов компьютерного моделирования методов одномодового сканирования, основанного на компенсации

сигналов изображений от дополнительных мод, появляющихся при превышении спектрального диапазона расстояния между соседними модами.

Увеличение диапазона сканирования в одномодовом режиме с компенсацией сигнала от высших порядков интерференции

Как было отмечено ранее, базовые диапазоны сканирования для отдельных мод строго ограничены. Количественная оценка этого ограничения для различных порядков интерференции m приведена в таблице 1, где представлены верхняя граница λ_{max} и диапазон сканирования $\Delta\lambda$ для одномодового режима.

Таблица 1. Диапазоны сканирования $\Delta\lambda=[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ модами $1 \leq m \leq 6$

m	1	2	3	4	5	6
$\lambda_{max\ m}$	$\lambda_{max1} = 2\lambda_{min}$	$\lambda_{max2} = \frac{3}{2}\lambda_{min}$ $= 1,5\lambda_{min}$	$\lambda_{max3} = \frac{4}{3}\lambda_{min}$ $= 1,3(3)\lambda_{min}$	$\lambda_{max4} = \frac{5}{4}\lambda_{min}$ $= 1,25\lambda_{min}$	$\lambda_{max5} = \frac{6}{5}\lambda_{min}$ $= 1,2\lambda_{min}$	$\lambda_{max6} = \frac{7}{6}\lambda_{min}$ $= 1,16(6)\lambda_{min}$
$\Delta\lambda$	λ_{min}	$0,5\lambda_{min}$	$0,3(3)\lambda_{min}$	$0,25\lambda_{min}$	$0,2\lambda_{min}$	$0,16(6)\lambda_{min}$

Как следует из данных таблицы, диапазон сканирования $\Delta\lambda$ сужается с ростом порядка интерференции m . Увеличение диапазона сканирования в компенсационных методах определяется расстоянием между компенсируемой модой и следующим после нее порядком интерференции. Так, например, при основной моде $m_c=1$ увеличение диапазона сканирования при компенсации сигнала от следующей после нее моды $m_k=2$ увеличивается на расстояние между модами $m=2$ и $m=3$, что соответствует расстоянию $1,5\lambda_{min}$.

Возможна компенсация с использованием нескольких компенсируемых мод, что увеличивает диапазон сканирования. При этом число предварительных сканирований определяется числом компенсируемых мод. Так, например, при основной моде $m_c=1$ увеличение диапазона сканирования при компенсации сигнала от следующих после нее мод $m_k=2$ и $m_k=3$ составит $1,5\lambda_{min} + 1,33(3)\lambda_{min} + 1,25\lambda_{min}$, поскольку при компенсации моды $m=2$ автоматически происходит компенсация моды $m_k=4$ и всех последующих четных мод.

Параметры сканирования определяются следующим образом. Задается нижняя граница диапазона сканирования λ_{min} , номер сканирующей моды m_c и номера компенсируемых мод m_k . Окончание сканирования определится при появлении на нижней границе диапазона сканирования λ_{min} моды с номером $m_{max}=m_{kmax}+1$, при этом верхняя граница диапазона сканирования будет соответствовать $\lambda_{max} = \frac{m_{max}\lambda_{min}}{m_c}$.

Воздушные зазоры для сканирующей моды, соответствующие диапазону сканирования $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$, определяются выражениями $d_{c\ min} = \frac{m_c \lambda_{min}}{2}$ и $d_{c\ max} = \frac{m_{max} \lambda_{min}}{2}$.

Воздушные зазоры для компенсируемых мод, соответствующие диапазону сканирования $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$, определяются выражениями $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{m_k}$ и $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{m_k}$.

Шаг сканирования для компенсируемых мод по отношению к шагу сканирующих мод определяется из соотношения $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{k}$, где $k = \frac{d_{c\ min}}{d_{k\ min}}$.

Формирование спектральных изображений осуществляется следующим образом, предварительно сканируется диапазон $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне $[d_{k\ min}, d_{k\ max}]$ с шагом δd_k , что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания $T_k(\lambda)$. Получаемые изображения $U_k(\lambda)$ запоминаются в блоке памяти. В случае компенсации с использованием нескольких компенсируемых мод выполняются дополнительные сканирования с соответствующими воздушными зазорами и шагом. Получаемые изображения $U_k(\lambda)$ также запоминаются в блоке памяти.

Затем сканируется диапазон $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне $[d_{c\ min}, d_{c\ max}]$ с шагом δd_c , что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания $T_c(\lambda)$. Из получаемых при этом изображений $U_c(\lambda)$ вычитаются полученные на соответствующих шагах сканирования изображения, считываемые с блока памяти, и формируются выходные изображения $U_{вых}(\lambda) = U_c(\lambda) - U_k(\lambda)$, в которых скомпенсирован сигнал от мод высших порядков интерференции, образующихся в процессе сканирования в пределах диапазона $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$.

Ниже рассматриваются результаты компьютерного моделирования частных случаев сканирования спектрального диапазона в одномодовом режиме с компенсацией сигнала от высших порядков интерференции. Для вычисления коэффициентов пропускания использовалась формула Эйри: $T(\lambda) = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2 \cdot R \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(\theta)}{\lambda}\right)}$ [9] при значениях угла падения лучистого потока $\theta=5^\circ$ и коэффициент отражения зеркальной поверхности $R=0,9$.

Одномодовое сканирование на порядке интерференции $m=1$ с компенсацией сигнала от моды $m=2$

В данном случае сканирующей модой является мода $m=1$. Таким образом, максимум моды $m=1$ в начале сканирования должен соответствовать его нижней границе λ_{min} . Запишем это условие как $\lambda_{min\ 1} = \lambda_{min}$ (рисунок 1). При этом положение максимума компенсируемой моды $m=2$ определится исходя из того, что $\lambda_{min\ 2} = \frac{\lambda_{min\ 1}}{2}$.

Соответствующий минимальный зазор $d_{c\ min}$ для сканирующей моды $m=1$ определяется выражением $d_{c\ min} = \frac{\lambda_{min}}{2}$. Соответствующий минимальный зазор $d_{k\ min}$ для компенсируемой моды $m=2$ равен $d_{k\ min} = \frac{\lambda_{min2}}{2} = \frac{\lambda_{min}}{4} = \frac{d_{c\ min}}{2}$.

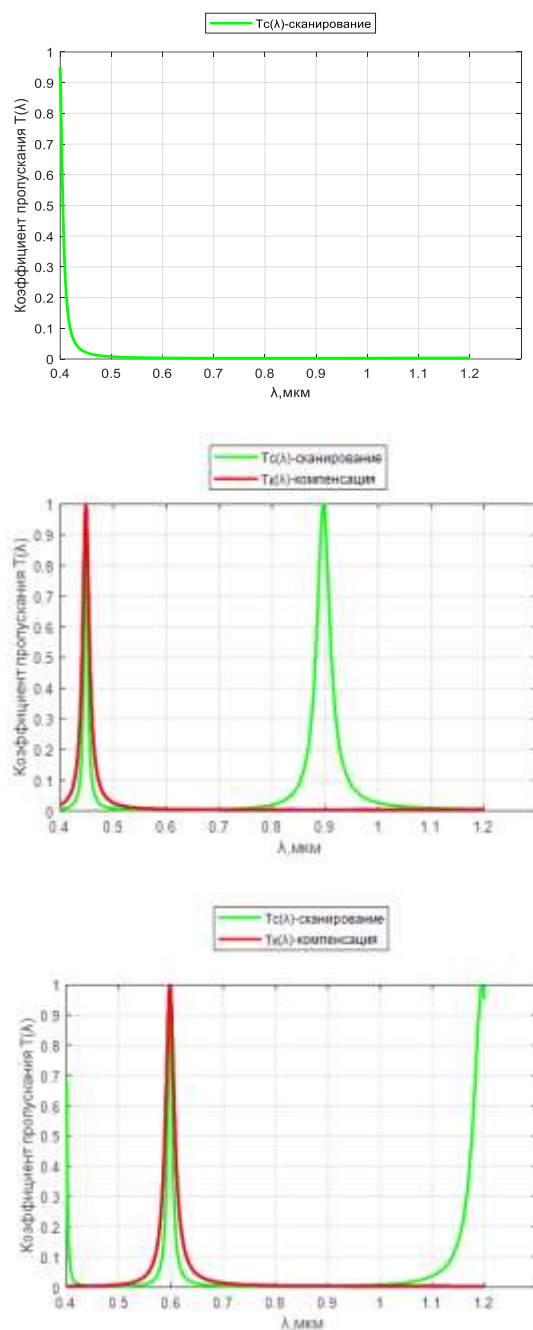


Рисунок 1. Иллюстрация сканирования видимой области спектра модой $m=1$ (график $T_c(\lambda)$) в диапазоне от $\lambda_{min}=400$ нм до $\lambda_{max}=1200$ нм при компенсации сигнала от моды $m=2$ (график $T_k(\lambda)$). Графики сверху соответствуют началу сканирования, в центре – середине сканирования, внизу – окончанию сканирования

Окончание сканирования в данном случае при компенсации моды $m=2$ будет соответствовать появлению на нижней границе λ_{min} максимума следующей моды, т. е. $m=3$. Запишем это условие как $\lambda_{max3}=\lambda_{min}$. При этом положение максимума моды $m=1$ будет соответствовать длине волны $\lambda_{max1}=3\lambda_{max3}=3\lambda_{min}$.

Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования $\lambda_{max} = \lambda_{max1} = 3\lambda_{min}$, а положение максимума компенсируемой моды $m=2$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{max3} = \frac{\lambda_{max1}}{3}$ и $\lambda_{max2} = \frac{\lambda_{max1}}{2}$, то $\lambda_{max2} = \frac{3\lambda_{max3}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{2}$.

Соответствующий максимальный зазор d_{cmax} для сканирующей моды $m=1$ определяется выражением $d_{cmax} = \frac{\lambda_{max1}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{2}$.

Соответствующий максимальный зазор d_{kmax} для компенсируемой моды $m=2$ равен $d_{kmax} = \frac{\lambda_{max2}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{4} = \frac{d_{cmax}}{2}$.

Параметры сканирования сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Параметры сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции $m=1$ с компенсацией сигнала от моды $m=2$

Параметр	d_{cmin}	d_{cmax}	d_{kmin}	d_{kmax}	δd_c	δd_k	λ_{min}	λ_{max1}
Значение	$\frac{\lambda_{min}}{2}$	$\frac{3\lambda_{min}}{2}$	$\frac{d_{cmin}}{2} = \frac{\lambda_{min}}{4}$	$\frac{d_{cmax}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{4}$	δd_c	$\frac{\delta d_c}{2}$	λ_{min}	$3\lambda_{min}$

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции $m=1$ с компенсацией сигнала от моды $m=2$ определяется расстоянием между нечетными порядками интерференции $m=1$ и $m=3$. Шаг сканирования для сканирующих и компенсируемых мод выбирается исходя из соотношения $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{2}$, поскольку $d_{kmin} = \frac{d_{cmin}}{2}$ и $d_{kmax} = \frac{d_{cmax}}{2}$.

Одномодовое сканирование на порядке интерференции $m=1$ с компенсацией сигнала от четных мод и моды $m=3$

В отличие от случая, рассмотренного выше, окончание сканирования модой $m=1$ при компенсации моды $m=2$ и дополнительной компенсации моды $m=3$ будет соответствовать появлению на нижней границе λ_{min} моды $m=5$, поскольку при компенсации моды $m=2$ автоматически компенсируются все четные моды (рисунок 2).

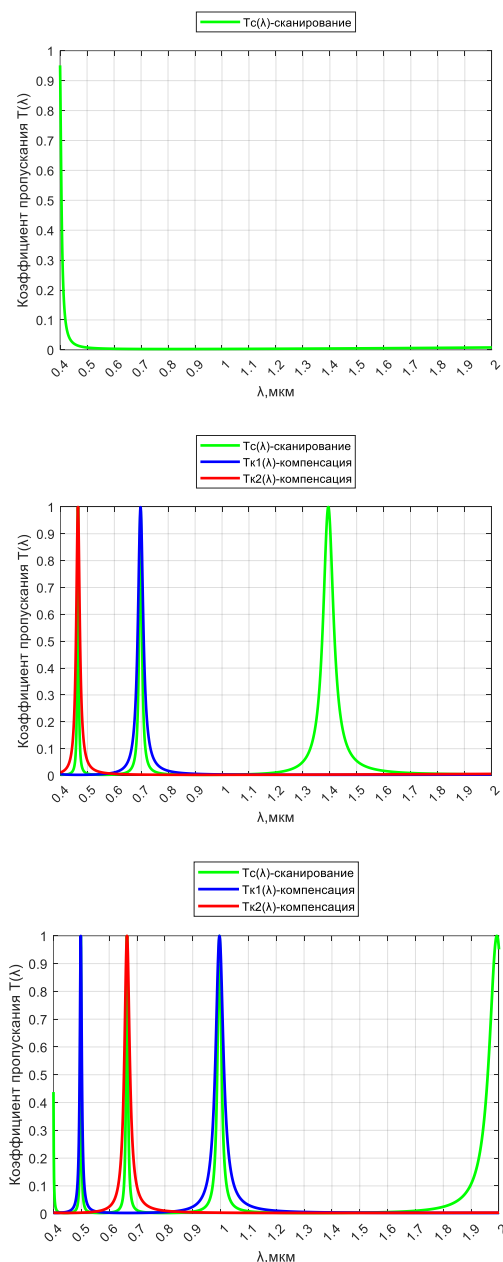


Рисунок 2. Иллюстрация сканирования видимой области спектра модой $m=1$ (график $T_c(\lambda)$) в диапазоне от $\lambda_{\min}=400$ нм до $\lambda_{\max}=2000$ нм (график $T_c(\lambda)$) при компенсации сигнала от моды $m=2$ и $m=4$ (график $T_k(\lambda)$), а также от моды $m=3$ (график $T_{k2}(\lambda)$). Графики сверху соответствуют началу сканирования, в центре – середине сканирования, внизу – окончанию сканирования

Запишем это условие как $\lambda_{\max 5} = \lambda_{\min}$. При этом положение максимума моды $m=1$ будет соответствовать длине волны $\lambda_{\max 1} = 5\lambda_{\max 5} = 5\lambda_{\min}$. Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования $\lambda_{\max} = \lambda_{\max 1} = 5\lambda_{\min}$. Параметры сканирующей моды и компенсирующей моды $m=2$ остаются без изменения: $d_{c \min} = \frac{\lambda_{\min}}{2}$ и $d_{k \min} = \frac{d_{c \min}}{2}$.

В результате положение максимума компенсируемой моды $m=2$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{max5} = \frac{\lambda_{max1}}{5}$, а $\lambda_{max2} = \frac{\lambda_{max1}}{2}$, то $\lambda_{max2} = \frac{5\lambda_{max5}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$, а для автоматически компенсируемой моды $m=4$, соответственно, $\lambda_{max4} = \frac{5\lambda_{min}}{4}$.

Соответствующий максимальный зазор $d_{c\ max}$ для сканирующей моды $m=1$ определится выражением $d_{c\ max} = \frac{\lambda_{max1}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$, а соответствующий максимальный зазор $d_{k\ max}$ для компенсируемой моды $m=2$ равен $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{2}$.

Поскольку $\lambda_{min3} = \frac{\lambda_{min1}}{3} = \frac{\lambda_{min}}{3}$, то соответствующий минимальный зазор $d_{k\ min}$ для дополнительно компенсируемой моды $m=3$ равен $d_{k\ min} = \frac{\lambda_{min3}}{2} = \frac{\lambda_{min}}{6} = \frac{d_{c\ min}}{3}$.

Поскольку $\lambda_{max3} = \frac{\lambda_{max1}}{3} = \frac{5\lambda_{min}}{3}$, то соответствующий максимальный зазор $d_{k\ max}$ для дополнительно компенсируемой моды $m=3$ равен $d_{k\ max} = \frac{\lambda_{max3}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{6} = \frac{d_{c\ max}}{3}$.

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции $m=1$ с компенсацией сигнала от моды $m=2$ и $m=3$ определяется расстоянием между нечетными порядками интерференции $m=1$ и $m=5$.

Шаг сканирования для компенсируемой моды $m=2$ выбирается исходя из соотношения $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{2}$, поскольку $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{2}$ и $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{2}$, а для компенсируемой моды $m=3$ исходя из соотношения $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{3}$, поскольку $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{3}$ и $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{3}$,

Параметры сканирования сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Параметры сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции $m=1$ для дополнительной компенсации сигнала от моды $m=3$

Параметр	$d_{c\ min}$	$d_{c\ max}$	$d_{k\ min}$	$d_{k\ max}$	δd_c	δd_k	λ_{min}	λ_{max1}
Значение	$\frac{\lambda_{min}}{2}$	$\frac{5\lambda_{min}}{2}$	$\frac{d_{c\ min}}{3} = \frac{\lambda_{min}}{6}$	$\frac{d_{c\ max}}{3} = \frac{5\lambda_{min}}{6}$	δd_c	$\frac{\delta d_c}{3}$	λ_{min}	$5\lambda_{min}$

Одномодовое сканирование на порядке интерференции $m=2$ с компенсацией сигнала от моды $m=3$

В данном случае сканирующей модой является мода $m=2$. Таким образом, максимум моды $m=2$ в начале сканирования должен соответствовать его нижней границе λ_{min} . Запишем это условие, как $\lambda_{min2} = \lambda_{min}$ (рисунок 3).

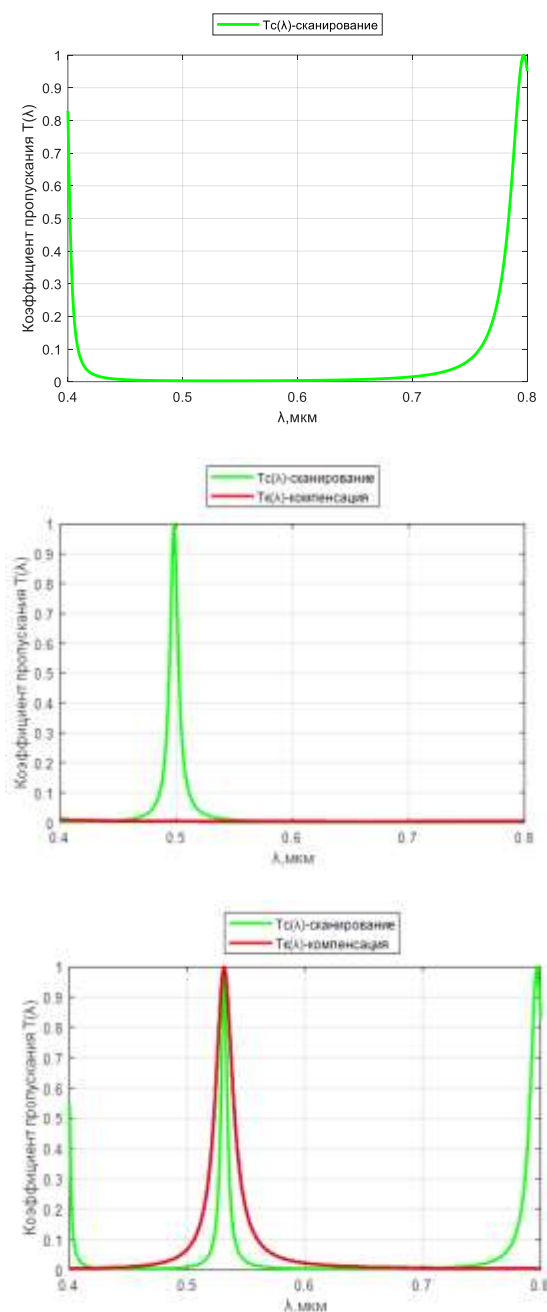


Рисунок 3. Иллюстрация сканирования видимой области спектра модой $m=2$ (график $T_c(\lambda)$) в диапазоне от $\lambda_{min}=400$ нм до $\lambda_{max}=800$ нм при компенсации сигнала от моды $m=2$ (график $T_k(\lambda)$). Графики сверху соответствуют началу сканирования, в центре – середине сканирования, внизу – окончанию сканирования

При этом положение максимума моды $m=1$ будет соответствовать $\lambda_{min\ 1}=2\lambda_{min}$, а положение максимума компенсируемой моды $m=3$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{min\ 3} = \frac{\lambda_{min\ 1}}{3}$, то $\lambda_{min\ 3} = \frac{2\lambda_{min}}{3}$.

Соответствующий минимальный зазор $d_{c\ min}$ для сканирующей моды $m=2$ определяется выражением $d_{c\ min} = \frac{\lambda_{min\ 1}}{2} = \lambda_{min}$. Соответствующий минимальный зазор $d_{к\ min}$ для компенсируемой моды $m=3$ равен $d_{к\ min} = \frac{\lambda_{min\ 3}}{2} = \frac{\lambda_{min}}{3} = \frac{d_{c\ min}}{3}$.

Окончание сканирования в данном случае при компенсации моды $m=3$ будет соответствовать появлению на нижней границе λ_{min} моды $m=4$.

Запишем это условие как $\lambda_{max\ 4} = \lambda_{min}$. При этом положение максимума моды $m=1$ будет соответствовать длине волны $\lambda_{max\ 1} = 4\lambda_{min}$, положение максимума сканирующей моды $m=2$ определится исходя из того, что $\lambda_{max\ 2} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{2}$, а положение максимума сканирующей моды $m=3$ определится исходя из того, что $\lambda_{max\ 3} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{3}$.

Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования $\lambda_{max} = \lambda_{max\ 2} = 2\lambda_{min}$. При этом предполагается предварительное выделение широкой зоны регистрации, соответствующей диапазону сканирования $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$. Соответствующий максимальный зазор $d_{c\ max}$ для сканирующей моды $m=2$ определяется выражением $d_{c\ max} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{2} = 2\lambda_{min}$.

Соответствующий максимальный зазор $d_{к\ max}$ для компенсируемой моды $m=3$ равен $d_{к\ max} = \frac{\lambda_{max\ 3}}{2} = \frac{4\lambda_{min}}{3} = \frac{d_{c\ max}}{3}$.

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции $m=2$ с компенсацией сигнала от моды $m=3$ определяется расстоянием между четными порядками интерференции $m=2$ и $m=4$.

Шаг сканирования для сканирующих и компенсируемых мод выбирается исходя из соотношения $\delta d_{к} = \frac{\delta d_{c}}{3}$, поскольку $d_{к\ min} = \frac{d_{c\ min}}{3}$ и $d_{к\ max} = \frac{d_{c\ max}}{3}$.

Параметры сканирования сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Параметры сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции $m=2$ с компенсацией сигнала от моды $m=3$

Параметр	$d_{c\ min}$	$d_{c\ max}$	$d_{к\ min}$	$d_{к\ max}$	δd_{c}	$\delta d_{к}$	λ_{min}	$\lambda_{max\ 1}$
Значение	λ_{min}	$2\lambda_{min}$	$\frac{d_{c\ min}}{3} = \frac{\lambda_{min}}{3}$	$\frac{d_{c\ max}}{3} = \frac{4\lambda_{min}}{3}$	δd_{c}	$\frac{\delta d_{c}}{3}$	λ_{min}	$2\lambda_{min}$

Как видно из рисунка 3, в начале сканирования модой $m=2$ присутствует сигнал от первой моды $m=1$, которая не компенсируется. Таким образом, одномодовый режим при сканировании модой $m=2$ выполняется в диапазоне от λ_{min} до $\lambda < \lambda_{max}$. В данном примере максимальный диапазон для одномодового режима составит от $\lambda_{min}=400$ нм до $\lambda_{max} \approx 750$ нм.

Одномодовое сканирование на порядке интерференции $m=2$ с компенсацией сигнала от моды $m=3$ и $m=4$

В отличие от случая, рассмотренного выше, окончание сканирования модой $m=2$ при компенсации моды $m=3$ и дополнительной компенсации моды $m=4$ будет соответствовать появлению на нижней границе λ_{min} моды $m=5$ (рисунок 4).

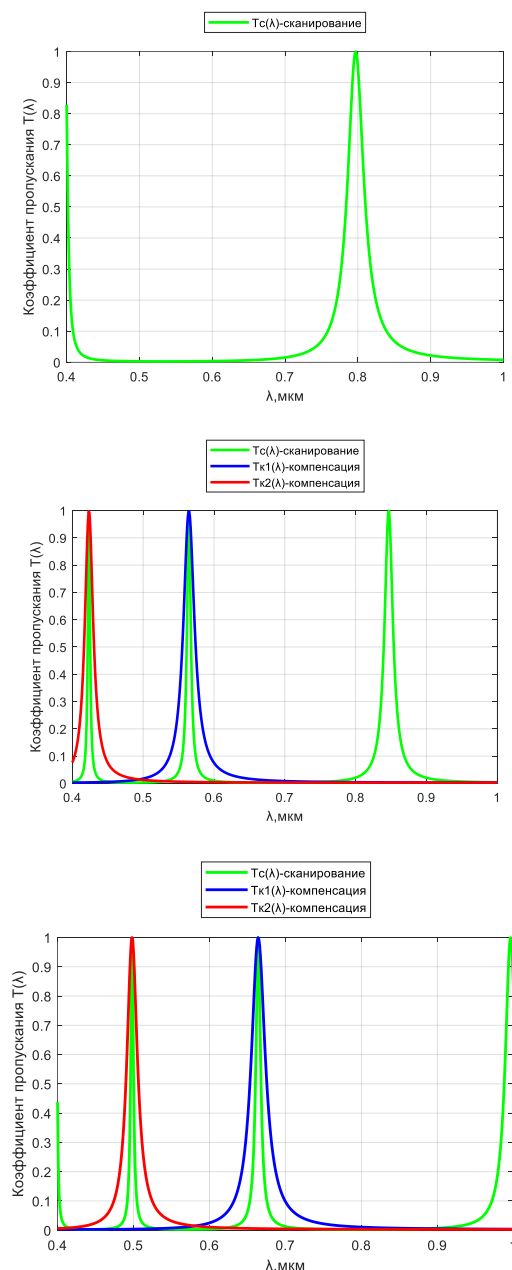


Рисунок 4. Иллюстрация сканирования видимой области спектра модой $m=2$ (график $T_c(\lambda)$) в диапазоне от $\lambda_{min}=400$ нм до $\lambda_{max}=1000$ нм при компенсации сигнала от четных мод $m=2$ и $m=4$ (график $T_{к1}(\lambda)$), а также от моды $m=3$ (график $T_{к2}(\lambda)$). Графики вверх соответствуют началу сканирования, в центре – середине сканирования, внизу – окончанию сканирования.

Запишем это условие как $\lambda_{max\ 5} = \lambda_{min}$. При этом положение максимума моды $m=1$ будет соответствовать длине волны $\lambda_{max\ 1} = 5\lambda_{max\ 5} = 5\lambda_{min}$, а положение максимума моды $m=2$ будет соответствовать длине волны $\lambda_{max\ 2} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$.

Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования $\lambda_{max} = \lambda_{max\ 2} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$. Параметры сканирующей и компенсируемой моды $m=3$ остаются без изменения: $d_{c\ min} = \lambda_{min}$ и $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{3}$.

В результате положение максимума компенсируемой моды $m=3$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{max\ 5} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{5}$, а $\lambda_{max\ 3} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{3}$, то $\lambda_{max\ 3} = \frac{5\lambda_{max\ 5}}{3} = \frac{5\lambda_{min}}{3}$, а для компенсируемой моды $m=4$, соответственно, $\lambda_{max\ 4} = \frac{5\lambda_{min}}{4}$.

Соответствующий максимальный зазор $d_{c\ max}$ для сканирующей моды $m=2$ определится выражением $d_{c\ max} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$.

Соответствующий максимальный зазор $d_{k\ max}$ для компенсируемой моды $m=3$ равен $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{3}$.

Поскольку $\lambda_{min\ 4} = \frac{\lambda_{min\ 1}}{4} = \frac{\lambda_{min}}{2}$, то соответствующий минимальный зазор $d_{k\ min}$ для дополнительно компенсируемой моды $m=4$ равен $d_{k\ min} = \frac{\lambda_{min\ 4}}{2} = \frac{\lambda_{min}}{4} = \frac{d_{c\ min}}{4}$.

Поскольку $\lambda_{max\ 4} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{4} = \frac{5\lambda_{min}}{4}$, то соответствующий максимальный зазор $d_{k\ max}$ для дополнительно компенсируемой моды $m=4$ равен $d_{k\ max} = \frac{\lambda_{max\ 4}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{8} = \frac{d_{c\ max}}{4}$.

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции $m=2$ с компенсацией сигнала от моды $m=3$ и $m=4$ определяется расстоянием между порядками интерференции $m=2$ и $m=5$.

Шаг сканирования для компенсируемой моды $m=3$ выбирается исходя из соотношения $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{3}$, поскольку $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{3}$ и $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{3}$, а для компенсируемой моды $m=4$ исходя из соотношения $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{4}$, поскольку $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{4}$ и $d_{k\ max} = \frac{d_{c\ max}}{4}$.

Параметры сканирования сведены в таблицу 5.

Таблица 5. Параметры сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции $m=2$ для дополнительной компенсации сигнала от моды $m=4$

Параметр	$d_{c\ min}$	$d_{c\ max}$	$d_{k\ min}$	$d_{k\ max}$	δd_c	δd_k	λ_{min}	$\lambda_{max\ 1}$
Значение	λ_{min}	$\frac{5\lambda_{min}}{2}$	$\frac{d_{c\ min}}{4} = \frac{\lambda_{min}}{4}$	$\frac{d_{c\ max}}{4} = \frac{5\lambda_{min}}{8}$	δd_c	$\frac{\delta d_c}{4}$	λ_{min}	$\frac{5\lambda_{min}}{2}$

Как видно из рисунка 4, в начале сканирования модой $m=2$ присутствует сигнал от первой моды $m=1$, которая не компенсируется. Таким образом, для выполнения одномодового режима в начале сканирования модой $m=2$ требуется ограничение диапазона сканирования до $\lambda \approx 700$ нм, а при достижении максимума этой моды данной длины волны расширение диапазона сканирования до значения λ_{max} за счет использования дополнительного отрезающего светофильтра.

Одномодовое сканирование на порядке интерференции $m=3$ с компенсацией сигнала от четных порядков интерференции

В данном случае сканирующей модой является мода $m=3$. Таким образом, максимум моды $m=3$ в начале сканирования должен соответствовать его нижней границе λ_{min} . Запишем это условие как $\lambda_{min 3} = \lambda_{min}$ (рисунок 5).

При этом положение максимума моды $m=1$ будет соответствовать $\lambda_{min 1} = 3\lambda_{min}$, а положение максимума компенсируемой моды $m=2$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{min 3} = \frac{\lambda_{min 1}}{3}$, а $\lambda_{min 2} = \frac{\lambda_{min 1}}{2}$, то $\lambda_{min 2} = \frac{3\lambda_{min 3}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{2}$.

Соответствующий минимальный зазор $d_{c min}$ для сканирующей моды $m=3$ определяется выражением $d_{c min} = \frac{\lambda_{min 1}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{2}$. Соответствующий минимальный зазор $d_{k min}$ для компенсируемой моды $m=2$ равен $d_{k min} = \frac{\lambda_{min 2}}{2} = \frac{3\lambda_{min}}{4} = \frac{d_{c min}}{2}$.

Окончание сканирования в данном случае при компенсации четных порядков интерференции будет соответствовать появлению на нижней границе λ_{min} моды $m=5$. Запишем это условие как $\lambda_{max 5} = \lambda_{min}$. При этом положение максимума моды $m=1$ будет соответствовать длине волны $\lambda_{max 1} = 5\lambda_{max 5} = 5\lambda_{min}$.

Тогда положение максимума компенсируемой моды $m=2$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{max 5} = \frac{\lambda_{max 1}}{5}$, а $\lambda_{max 2} = \frac{\lambda_{max 1}}{2}$, то $\lambda_{max 2} = \frac{5\lambda_{max 5}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$.

Положение максимума сканирующей моды $m=3$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{max 3} = \frac{\lambda_{max 1}}{3}$, то $\lambda_{max 3} = \frac{5\lambda_{max 5}}{3} = \frac{5\lambda_{min}}{3}$. Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования $\lambda_{max} = \lambda_{max 3} = \frac{5\lambda_{min}}{3}$.

Соответствующий максимальный зазор $d_{c max}$ для сканирующей моды $m=3$ определяется выражением $d_{c max} = \frac{\lambda_{max 1}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$.

Соответствующий максимальный зазор $d_{k max}$ для компенсируемой моды $m=2$ равен $d_{k max} = \frac{\lambda_{max 2}}{2} = \frac{5\lambda_{min}}{4} = \frac{d_{c max}}{2}$.

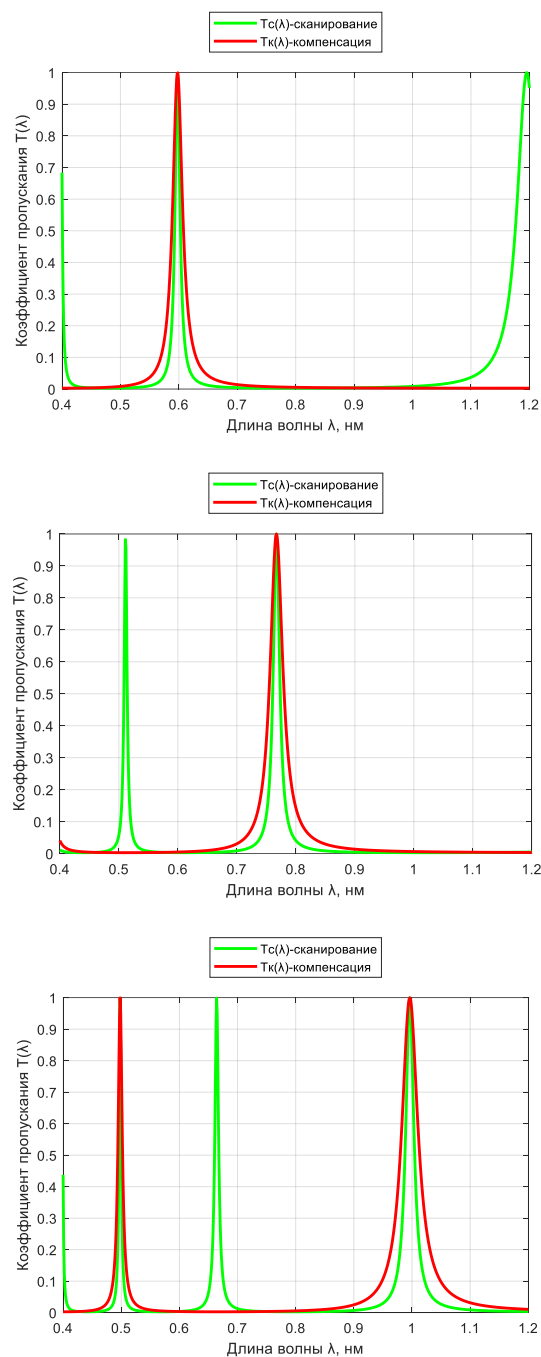


Рисунок 5. Иллюстрация компенсации сигнала от четных мод $m=2$ и $m=4$ (график $T_k(\lambda)$) при сканировании видимой области спектра модой $m=3$ (график $T_c(\lambda)$) в диапазоне от $\lambda_{min}=400$ нм до $\lambda_{max}=666$ нм. Графики вверху соответствуют началу сканирования, в центре – середине сканирования, внизу – окончанию сканирования

Таким образом, диапазон сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции $m=3$ с компенсацией сигнала от четных порядков интерференции определяется расстоянием между нечетными порядками интерференции $m=3$ и $m=5$.

Шаг сканирования для сканирующих и компенсируемых мод выбирается исходя из соотношения $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{2}$, поскольку $d_{k \min} = \frac{d_{c \min}}{2}$ и $d_{k \max} = \frac{d_{c \max}}{2}$.

Параметры сканирования сведены в таблицу 6.

Таблица 6. Параметры сканирования в одномодовом режиме на порядке интерференции $m=3$ с компенсацией сигнала от четных порядков интерференции

Параметр	$d_{c \min}$	$d_{c \max}$	$d_{k \min}$	$d_{k \max}$	δd_c	δd_k	λ_{\min}	$\lambda_{\max 1}$
Значение	$\frac{3\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{5\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{d_{c \min}}{2} = \frac{3\lambda_{\min}}{4}$	$\frac{d_{c \max}}{2} = \frac{5\lambda_{\min}}{4}$	δd_c	$\frac{\delta d_c}{2}$	λ_{\min}	$\frac{5\lambda_{\min}}{3}$

Формирование спектральных изображений (рисунок 5) осуществляется следующим образом. Предварительно сканируется диапазон $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне $[d_{k \min}, d_{k \max}]$ с шагом δd_k , что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания $T_{k2}(\lambda)$. Получаемые изображения $U_{k2}(\lambda)$ запоминаются в блоке памяти.

Затем сканируется диапазон $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне $[d_{c \min}, d_{c \max}]$ с шагом δd_c , что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания $T_c(\lambda)$. Из получаемых при этом изображений $U_c(\lambda)$ вычитаются полученные на соответствующих шагах сканирования изображения, считываемые с блока памяти. Тем самым в выходных изображениях $U_{\text{вых}}(\lambda) = U_c(\lambda) - U_{k2}(\lambda)$ производится компенсация сигнала от четных мод, образующихся в процессе сканирования в пределах диапазона $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$.

При этом предполагается предварительное ограничение диапазона сканирования значением λ_{\max} .

Увеличение диапазона сканирования за счет дополнительной компенсации сигналов от мод высших порядков интерференции $m=5$ и $m=7$

Верхнюю границу λ_{\max} при сканировании модой $m=3$ с компенсацией сигналов от четных порядков интерференции можно увеличить путем дополнительной компенсации сигналов от мод высших порядков интерференции, например $m=5$ и $m=7$ (рисунок 6). Для этого требуется дополнительное сканирование с определенным шагом и соответствующим диапазоном изменения воздушного зазора. Рассмотрим процесс дополнительной компенсации сигнала от моды $m=5$.

В данном случае минимальный зазор $d_{k \min}$ для порядка $m=1$ компенсируемой моды должен соответствовать порядку $m=5$ сканирующей моды при его появлении на нижней границе диапазона сканирования λ_{\min} . Иначе говоря, зазору $d_k = \frac{\lambda_{\min}}{2}$ должен

соответствовать зазор $d_c = \frac{5\lambda_{min}}{2}$ и должно выполняться соотношение $d_k = \frac{d_c}{5}$. Таким образом, минимальный зазор $d_{k min}$ в начале сканирования для компенсируемой моды $m=5$ равен $d_{k min} = \frac{d_c min}{5}$

Окончание сканирования в данном случае будет соответствовать появлению на нижней границе λ_{min} максимума моды для следующего нечетного порядка интерференции, т. е. $m=7$. Запишем это условие как $\lambda_{max 7} = \lambda_{min}$.

В этом случае положение максимума моды $m=1$ будет соответствовать длине волны $\lambda_{max 1} = 7\lambda_{max 7} = 7\lambda_{min}$. Положение максимума сканирующей моды $m=3$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{max 3} = \frac{\lambda_{max 1}}{3}$, то в данном случае $\lambda_{max 3} = \frac{7\lambda_{max 7}}{3} = \frac{7\lambda_{min}}{3}$. Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования увеличивается с $\lambda_{max} = \frac{5\lambda_{min}}{3}$ до $\lambda_{max} = \lambda_{max 3} = \frac{7\lambda_{min}}{3}$, а соответствующий максимальный зазор для сканирующей моды $m=3$ увеличивается с $d_{c max} = \frac{5\lambda_{min}}{2}$ до $d_{c max} = \frac{\lambda_{min 7}}{2} = \frac{7\lambda_{min}}{2}$.

Положение максимума компенсируемой моды $m=5$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{max 5} = \frac{\lambda_{max 1}}{5}$, то в данном случае $\lambda_{max 5} = \frac{7\lambda_{max 7}}{5} = \frac{7\lambda_{min}}{5}$.

Соответствующий максимальный зазор $d_{k max}$ для компенсируемой моды $m=5$ равен $d_{k max} = \frac{\lambda_{max 5}}{2} = \frac{7\lambda_{min}}{10} = \frac{d_{c max}}{5}$.

Шаг сканирования для сканирующих и компенсируемых мод выбирается исходя из соотношения $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{5}$, поскольку $d_{k min} = \frac{d_c min}{5}$ и $d_{k max} = \frac{d_c max}{5}$.

Параметры сканирования сведены в таблицу 7.

Таблица 7. Параметры сканирования для компенсации сигнала от моды $m=5$

Параметр	$d_c min$	$d_c max$	$d_k min$	$d_k max$	δd_c	δd_k	λ_{min}	$\lambda_{max 1}$
Значение	$\frac{5\lambda_{min}}{2}$	$\frac{7\lambda_{min}}{2}$	$\frac{d_c min}{5} = \frac{\lambda_{min}}{2}$	$\frac{d_c max}{5} = \frac{7\lambda_{min}}{10}$	δd_c	$\frac{\delta d_c}{5}$	λ_{min}	$\frac{7\lambda_{min}}{3}$

Для дополнительной компенсации сигналов от моды $m=5$ предварительно сканируется диапазон $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне $[d_{k min}, d_{k max}]$ с шагом $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{5}$, что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания $T_{k5}(\lambda)$. Получаемые компенсирующие изображения $U_{k5}(\lambda)$ запоминаются в блоке памяти.

Выходные изображения формируются путем вычитания компенсирующих изображений из соответствующих изображений, полученных от сканирующей моды: $U_{вых}(\lambda) = U_c(\lambda) - U_{k2}(\lambda) - U_{k5}(\lambda)$ (рисунок 6).

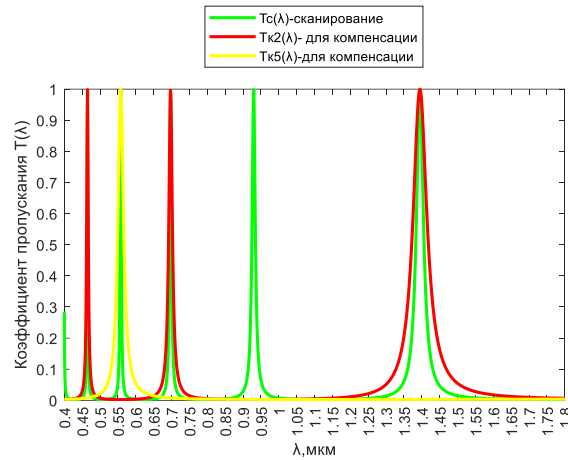


Рисунок 6. Иллюстрация компенсации сигнала от четных мод (график $T_{k2}(\lambda)$) и дополнительной компенсации от моды $m=5$ (график $T_{k5}(\lambda)$) при сканировании видимой области спектра модой $m=3$ от $\lambda_{min}=400$ нм до $\lambda_{max}=933$ нм (график $T_c(\lambda)$). Графики соответствуют окончанию сканирования

Рассмотрим процесс дополнительной компенсации сигнала от моды $m=7$.

В данном случае минимальный зазор $d_{k\ min}$ для порядка $m=1$ компенсируемой моды должен соответствовать порядку $m=7$ сканирующей моды при его появлении на нижней границе диапазона сканирования λ_{min} . Иначе говоря, зазору $d_k = \frac{\lambda_{min}}{2}$ должен соответствовать зазор $d_c = \frac{7\lambda_{min}}{2}$ и должно выполняться соотношение $d_k = \frac{d_c}{7}$. Таким образом, минимальный зазор $d_{k\ min}$ в начале сканирования для компенсируемой моды $m=7$ равен $d_{k\ min} = \frac{d_{c\ min}}{7}$

Окончание сканирования в данном случае будет соответствовать появлению на нижней границе λ_{min} максимума моды для следующего нечетного порядка интерференции $m=9$. Запишем это условие как $\lambda_{max\ 9} = \lambda_{min}$.

Тогда положение максимума моды $m=1$ будет соответствовать длине волны $\lambda_{max\ 1} = 9\lambda_{max\ 9} = 9\lambda_{min}$. Положение максимума сканирующей моды $m=3$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{max\ 3} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{3}$, то $\lambda_{max\ 3} = \frac{9\lambda_{max\ 9}}{3} = \frac{9\lambda_{min}}{3} = 3\lambda_{min}$.

Таким образом, верхняя граница диапазона сканирования увеличивается с $\lambda_{max} = \frac{7\lambda_{min}}{3}$ до $\lambda_{max} = \lambda_{max\ 3} = 3\lambda_{min}$, а соответствующий максимальный зазор для сканирующей моды $m=3$ увеличивается с $d_{c\ max} = \frac{7\lambda_{min}}{2}$ до $d_{c\ max} = \frac{\lambda_{min\ 9}}{2} = \frac{9\lambda_{min}}{2}$.

Положение максимума компенсируемой моды $m=7$ определится исходя из того, что поскольку $\lambda_{max\ 7} = \frac{\lambda_{max\ 1}}{7}$, то в данном случае $\lambda_{max\ 7} = \frac{9\lambda_{max\ 9}}{7} = \frac{9\lambda_{min}}{7}$.

Соответствующий максимальный зазор $d_{k\ max}$ для компенсируемой моды $m=7$ равен $d_{k\ max} = \frac{\lambda_{max\ 7}}{2} = \frac{9\lambda_{min}}{14} = \frac{d_{c\ max}}{7}$.

Шаг сканирования для сканирующих и компенсируемых мод выбирается исходя из соотношения $\delta d_k = \frac{\delta d_c}{7}$, поскольку $d_{k \min} = \frac{d_{c \min}}{7}$ и $d_{k \max} = \frac{d_{c \max}}{7}$.

Параметры сканирования сведены в таблицу 8.

Таблица 8. Параметры сканирования для компенсации сигнала от моды $m=7$

Параметр	$d_{c \min}$	$d_{c \max}$	$d_{k \min}$	$d_{k \max}$	δd_c	δd_k	λ_{\min}	$\lambda_{\max 1}$
Значение	$\frac{7\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{9\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{d_{c \min}}{7} = \frac{\lambda_{\min}}{2}$	$\frac{d_{c \max}}{7} = \frac{9\lambda_{\min}}{14}$	δd_c	$\frac{\delta d_c}{7}$	λ_{\min}	$3\lambda_{\min}$

Для дополнительной компенсации сигналов от моды $m=7$ предварительно сканируется диапазон $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ путем изменения воздушного зазора ФПИ в диапазоне $[d_{k \min}, d_{k \max}]$ с шагом δd_k в соответствии с параметрами, указанными в таблице 8, что соответствует пошаговому изменению коэффициента пропускания $T_{k7}(\lambda)$. Получаемые компенсирующие изображения $U_{k7}(\lambda)$ запоминаются в блоке памяти.

Выходные изображения формируются путем вычитания компенсирующих изображений из соответствующих изображений, полученных от сканирующей моды (рисунок 7): $U_{\text{вых}}(\lambda) = U_c(\lambda) - U_{k2}(\lambda) - U_{k5}(\lambda) - U_{k7}(\lambda)$. При этом предполагается предварительное ограничение диапазона сканирования значением λ_{\max} .

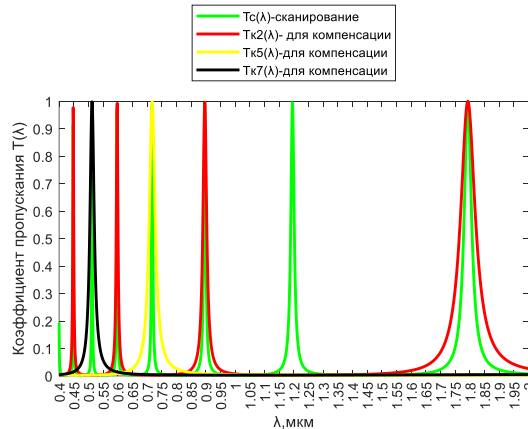


Рисунок 7. Иллюстрация компенсации сигнала от четных мод (график $T_{k2}(\lambda)$) и дополнительной компенсации от моды $m=5$ (график $T_{k5}(\lambda)$) и моды $m=7$ (график $T_{k7}(\lambda)$) при сканировании видимой области спектра модой $m=3$ от $\lambda_{\min}=400\text{ нм}$ до $\lambda_{\max}=1200\text{ нм}$ (график $T_c(\lambda)$). Графики соответствуют окончанию сканирования

Заключение

Диапазон сканирования ГСС на базе ФПИ в одномодовом режиме работы ограничивается расстоянием между смежными модами.

Компенсационные методы формирования изображений ГСС на базе ФПИ обеспечивают возможность расширения диапазона спектрального сканирования с получением изображений, соответствующих заданной сканирующей моде.

Увеличение диапазона сканирования соответствует расстоянию между сканирующей модой и модой, используемой для получения компенсирующих изображений.

Расширение диапазона в одномодовом режиме требует дополнительного сканирования спектрального диапазона на компенсирующей моде, что обуславливает поиск компромисса между быстродействием системы и шириной диапазона сканирования.

Список литературы

1. Чесноков А. Е. Исследование оптических характеристик многослойных структур управляемого резонатора Фабри–Перо // Гео-Сибирь-2007: сборник материалов III Международного научного конгресса, 25–27 апреля 2007 г.: в 6 т. Т. 4, ч. 1: Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Новосибирск: Сибирская государственная геодезическая академия, 2007. С. 167–170.
2. Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Кочкарев Д. В., Никулин Д. М., Шергин С. Л. Гиперспектральные видеоанализаторы на основе электроуправляемых интерферометров Фабри–Перо // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015: сборник материалов XI Международного научного конгресса и Международной научной конференции «СибОптика–2015», 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск: в 3 т. Т. 1. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. 3–11.
3. Zucco M., Pisani M., Caricato V., Egidi A. A hyperspectral imager based on a Fabry-Perot interferometer with dielectric mirrors // Optics Express. 2014. 22 (2). 1824–1834. DOI: 10.1364/OE.22.001824
4. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А., Быстров Н. Е. Компьютерное моделирование процесса формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри–Перо // Вестник НовГУ. 2023. 5 (134). 680–687. DOI: 10.34680/20768052.2023.5(134).680-687
5. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Компьютерное моделирование одномодового режима работы гиперспектральной системы на базе интерферометра Фабри–Перо и трехканального матричного фотоприемника // Вестник НовГУ. 2025. 1 (139). 69–81. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).69-81
6. Хорохоров А. М., Ивашкина Е. С., Гурылева А. В. Патент № 2801836 С1 Российская Федерация, МПК G01J 3/02 (2023,05), G01N 21/25 (2023,05). Быстродействующий гиперспектрометр с управляемым спектральным фильтром: № 2022131265: заявл. 30.11.2022: опубл. 16.08.2023; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана».

7. Гурылева А. В., Хорохоров А. М., Кобозев В. С. Методы повышения спектрального разрешения изображающих спектрометров, построенных на основе многоканальных приемников излучения // Светотехника. 2020. 3. 78–85.

8. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А., Гуляев А. А., Московский М. Н. Патент № 230837 Российская Федерация МПК H04N7/00 (2024.08), G01J3/02 (2024.08), G01J3/28 (2024.08), G01J 3/50 (2024.08), G01N 21/25 (2024.08). Телевизионное гиперспектральное устройство: 2024126336: заявл. 06.09.2024; опубл. 23.12.2024; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого».

9. Бутиков Е. И. Оптика: учебное пособие. 3-е изд., доп. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 608 с.

References

1. Chesnokov A. E. Investigation of optical characteristics of multilayer structures of a controlled Fabry–Perot resonator // Proceedings of the III International Scientific Congress "GEO-Siberia-2007". Vol. 4. Part 1. Novosibirsk: SGGA, 2007. 167–170. (In Russian).

2. Chesnokov, V. V., Chesnokov, D. V., Kochkarev, D. V., Nikulin, D. M., Shergin, S. L. Hyperspectral video analyzers based on electro-controlled Fabry–Perot interferometers // Interexpo GEO–Siberia–2015: Proceedings of the 11th International Scientific Congress and International Conference "SibOptica–2015", Novosibirsk, April 13–25, 2015. Vol. 1. Novosibirsk: Siberian State University of Geosystems and Technologies Publ., 2015. 3–11. (In Russian).

3. Zucco M., Pisani M., Caricato V., Egidi A. A hyperspectral imager based on a Fabry-Perot interferometer with dielectric mirrors // Optics Express. 2014. 22 (2).1824–1834. DOI: 10.1364/OE.22.001824

4. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebriakov D. A., Bystrov N. E. Computer simulation of the imaging process in a hyperspectral system based on the Fabry–Perot interferometer // Vestnik NovSU. 2023. 5 (134). 680–687. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).680-687 (In Russian).

5. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Computer simulation of singlemode of operation of a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer and a three-channel matrix sensor // Vestnik NovSU. 2025. 1 (139). 69–81. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).69-81 (In Russian).

6. Khorokhorov, A. M., Ivashkina, E. S., Guryleva, A. V. High-speed hyperspectrometer with a controlled spectral filter. // Patent of the Russian Federation No. 2801836 C1. IPC G01J 3/02 (2023.05), G01N 21/25 (2023.05). Application No. 2022131265, filed 30 Nov 2022, published 16 Aug 2023. Applicant: Bauman Moscow State Technical University. (In Russian).

7. Guryleva A. V., Khorokhorov A. M., Kobozev V. S. Methods of increasing the spectral resolution of imaging spectrometers based on multichannel radiation receivers // 2020. 3. 78–85. (In Russian).

8. Gareev, V. M., Gareev, M. V., Kornyshev, N. P., Serebryakov, D. A., Gulyaev, A. A., Moskovsky, M. N. Television hyperspectral device. // Patent of the Russian Federation No. 230837. IPC H04N 7/00 (2024.08), G01J 3/02 (2024.08), G01J 3/28 (2024.08),

G01J 3/50 (2024.08), G01N 21/25 (2024.08). Appl. No. 2024126336, filed 06 Sep 2024, publ. 23 Dec 2024. Applicant: Yaroslav-the-Wise Novgorod State University. (In Russian).

9. Butikov E. I. Optics: Textbook. 3rd ed., revised and expanded. St. Petersburg: Lan' Publ., 2012. 608 p. (In Russian).

Информация об авторах

Корнышев Николай Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-3177-2040, Nikolai.Kornishev@novsu.ru

Серебряков Дмитрий Александрович – ассистент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-5994-5090, s231099@std.novsu.ru

РАДИОФИЗИКА

УДК 539.5

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).400-407

Поступила в редакцию / Received 05.05.2025

ГРНТИ 30.19.15

Специальность ВАК 1.3.4.

Принята к публикации / Accepted 24.09.2025

Научная статья

НЕМОНОТОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ ОБЛУЧЕННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Малашенко В. В.

Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия)

Аннотация. В рамках теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) выполнен анализ пластической деформации облученных металлов и сплавов в условиях высоких внешних нагрузок. Получено аналитическое выражение зависимости динамического предела текучести от концентрации призматических дислокационных петель и точечных дефектов. Зависимость динамического предела текучести от концентрации точечных дефектов является немонотонной и имеет минимум. Положение минимума определяется конкуренцией сил динамического торможения дислокаций различными типами структурных дефектов.

Ключевые слова: дислокации, высокоскоростная деформация, облученные металлы, радиационные дефекты, динамический предел текучести

Для цитирования: Малашенко В. В. Немонотонная концентрационная зависимость динамического предела текучести облученных металлов и сплавов // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 400–407. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).400-407

Research Article

NONMONOTONE CONCENTRATION DEPENDENCE OF THE DYNAMIC YIELD STRENGTH OF IRRADIATED METALS AND ALLOYS

Malashenko V. V.

Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering (Donetsk, Russia)

Abstract. Within the framework of the theory of dynamic interaction of defects (DID), an analysis of plastic deformation of irradiated metals and alloys under the high-energy impacts is performed. An analytical expression for the dependence of the dynamic yield strength on the concentration of prismatic dislocation loops and point defects is obtained. The dependence of the dynamic yield strength on the concentration of point defects is nonmonotonic and has a minimum. The position of the minimum is due to the competition between the dynamic drag forces of dislocations caused by different types of structural defects.

Keywords: dislocations, high strain rate deformation, irradiated metals, radiation defects, dynamic yield stress

For citation: Malashenko V. V. Nonmonotone concentration dependence of the dynamic yield strength of irradiated metals and alloys // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 400–407. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).400-407

Введение

Радиационное облучение металлов и сплавов оказывает значительное влияние на структуру этих материалов, порождая огромное количество дефектов, в частности, призматических дислокационных петель и точечных дефектов [1]. Такие дефекты оказывают большое влияние на неупругие процессы и формирование механических свойств этих функциональных материалов. В процессе обработки и эксплуатации изделия из металлов и сплавов могут подвергаться высокоэнергетическим внешним воздействиям, порождающим высокоскоростную деформацию этих материалов [2–5]. При высокоскоростном деформировании дислокации совершают надбарьерное скольжение, преодолевая встречающиеся на их пути дефекты динамическим образом, т. е. без помощи тепловых флуктуаций. В этой области возрастает роль коллективных динамических эффектов, в результате чего влияние структурных дефектов на формирование механических свойств приобретает специфические особенности, не проявляющиеся в условиях квазистатической деформации.

Целью настоящей работы является получение аналитической зависимости динамического предела текучести облученных металлов и сплавов от концентрации точечных радиационных дефектов.

Основная часть

Быстротекущие процессы, характерные для высокоскоростной деформации, чаще всего анализируются с помощью компьютерного моделирования в рамках метода молекулярной динамики (ММД) [6]. Этот метод признан весьма эффективным, он имеет массу достоинств, позволяет визуализировать быстротекущие процессы и делать их весьма наглядными. Однако он, как и любой метод, имеет свои ограничения. В частности, не позволяет работать с большим количеством атомов и получать аналитические выражения зависимостей механических характеристик материала от состояния его дефектной системы и условий деформирования, например, от скорости пластической деформации. Для широкого круга задач динамики дислокаций проблема получения аналитических зависимостей весьма успешно решается в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) [7–9]. Эта теория является феноменологической и тоже имеет свои ограничения. В частности, она не учитывает процессы зарождения и аннигиляции дислокаций в процессе пластической деформации и не дает точное численное значение исследуемых характеристик, позволяя определять только порядок их величины. Однако теория ДВД адекватно описывает механизм диссипации в условиях больших нагрузок и эффекты коллективного взаимодействия различных типов структурных дефектов. Кроме того, теория ДВД является весьма наглядной и физически прозрачной. Благодаря этому удалось дать удовлетворительное

объяснение большому числу экспериментальных результатов, а также предсказать новые динамические эффекты, проверка которых может оказать стимулирующее действие на целенаправленную постановку новых экспериментов. Кроме того, физическая прозрачность данной теории позволила выявить общие черты динамического поведения весьма сильно отличающихся физических систем.

Теория ДВД базируется на хорошо известной и хорошо зарекомендовавшей себя теории Гранато-Люкке. Эти исследователи рассматривали дислокацию как упругую струну, имеющую линейное натяжение и массу полевого происхождения. По порядку величины масса струны равна массе материала, заключенного в трубке с радиусом равным модулю вектора Бюргерса. Для грубых оценок обычно принимают линейную плотность дислокации равной 10^{-16} кг/м. Одним из основных отличий теории ДВД от струнной теории Гранато-Люкке является учет нелинейности спектра дислокационных колебаний, ранее в задачах по динамике дислокаций этого не делалось, рассматривался только линейный спектр

$$\omega(q_z) = cq_z, \quad (1)$$

где ω – частота дислокационных колебаний, q_z – компонента волнового вектора параллельная линии дислокации, c – скорость распространения в металле поперечных звуковых волн. Учет эффектов коллективного взаимодействия точечных дефектов с исследуемой скользящей дислокацией либо коллективного взаимодействия других дислокаций движущегося скопления с данной дислокацией приводит к тому, что спектр колеблющейся дислокации становится нелинейным: в нем появляется спектральная щель Δ

$$\omega(q_z) = \sqrt{c^2 q_z^2 + \Delta^2}. \quad (2)$$

Наличие щели в дислокационном колебательном спектре является следствием того факта, что дислокация колеблется в потенциальной яме параболического сечения и любые смещения дислокационного элемента от положения равновесия приводят к возникновению квазиупругой силы, пропорциональной величине смещения и направленной против него. До создания теории ДВД нелинейный спектр дислокационных колебаний анализировался лишь однажды – в задаче о колебаниях дислокации в рельефе Пайерлса [10]. Однако этот рельеф неподвижен, и дислокация совершала в нем малые колебания, не перемещаясь по кристаллу. Теория ДВД позволяет решать задачи о колебаниях дислокации в подвижной потенциальной яме, которая перемещается по деформируемому кристаллу вместе с движущейся дислокацией. Как было отмечено выше, такая яма может быть создана коллективным воздействием на данную дислокацию других дислокаций ансамбля либо точечных дефектов. Кроме того, она может возникнуть в результате магнитоупругого

взаимодействия с магнитной системой либо в результате действия сил изображения в приповерхностной области.

В настоящей работе в рамках теории ДВД анализируется скольжение ансамбля краевых дислокаций в облученном металле, содержащем как точечные радиационные дефекты, так и призматические дислокационные петли радиационного происхождения. Как известно, наиболее высокая концентрация этих петель достигается именно в результате облучения. Все петли для простоты будем считать одинаковыми и имеющими радиус R . Внешнее напряжение обозначим σ_0 , именно оно перемещает дислокации вдоль оси OX с постоянной скоростью v . Векторы Бюргерса краевых дислокаций равны по модулю b и параллельны оси OX , а дислокационные линии параллельны оси OZ . Дислокации перемещаются в плоскостях параллельных плоскости XOZ . Положение дислокации определяет функция

$$X(y = 0, z, t) = vt + w(y = 0, z, t). \quad (3)$$

Функция $w(z, t)$ описывает поперечные дислокационные колебания, возбуждаемые структурными дефектами, которые дислокация преодолевает в ходе перемещения по кристаллу.

Поскольку исследуемая нами дислокация является упругой струной, уравнение ее движения представляет собой неоднородное волновое уравнение, в правой части которого содержится сумма всех сил, действующих на данную дислокацию

$$m \left\{ \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right\} = F_{dis} + b[\sigma_0 + \sigma_{xy}^L + \sigma_{xy}^d] - B \frac{\partial X}{\partial t}, \quad (4)$$

где F_{dis} – суммарная сила, которая действует на исследуемую дислокацию со стороны всех других дислокаций ансамбля, σ_{xy}^L – компонента тензора напряжений, которые создаются на дислокационной линии дислокационными петлями, σ_{xy}^d – компонента тензора напряжений, созданных на этой линии радиационными точечными дефектами, m – масса единицы длины движущейся дислокации, B – константа фононного торможения.

Поскольку в настоящей работе рассматриваются малые дислокационные колебания, силу динамического торможения дислокации структурными дефектами определенного типа можно вычислить, разлагая в ряд исходное выражение до второго порядка с последующим усреднением полученного выражения по случайному распределению точечных дефектов и по длине дислокации. Так как функция $w(z, t)$ является величиной случайной, ее среднее значение будет равняться нулю.

Процедура усреднения заключается в вычислении следующих интегралов:

$$\langle f(r_i) \rangle = \frac{1}{L_{dis}} \int_L dz \int_V \prod_{i=1}^N f(r_i) \frac{dr_i}{V^N}, \quad (5)$$

где N – число структурных дефектов в металле, V – объем исследуемого образца, L_{dis} – дислокационная длина.

Вклад силы торможения дислокаций структурными дефектами определенного типа также можно определить с помощью теории возмущений

$$\tau = \left\langle \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial X} w_x \right\rangle. \quad (6)$$

Входящая в данное выражение функция $w_x(z, t)$ может быть вычислена с помощью функции Грина

$$w_x = \iint dt' dz' G(z - z', t - t') \frac{b}{m} \sigma_{xy}(z', t'), \quad (7)$$

где G – функция Грина уравнения движения исследуемой краевой дислокации. Фурье-образ этой функции имеет вид

$$G(\omega, q_z) = \frac{1}{\omega^2 + iBm^{-1}\omega - c^2 q_z^2 - \Delta^2}. \quad (8)$$

Вклад каждого типа дефектов в динамический предел текучести облученного металла после выполнения необходимых математических преобразований может быть записан в следующем виде

$$\tau = \frac{n_L b}{8\pi^2 m} \int d^3 q |q_x| \cdot |\sigma_{xy}(\mathbf{q})|^2 \delta(q_x^2 v^2 - c^2 q_z^2 - \Delta^2), \quad (9)$$

где n – объемная концентрация структурных дефектов данного типа, $\sigma_{xy}(\mathbf{q})$ – Фурье-образ компоненты тензора напряжений, создаваемых дефектом этого типа.

Как было отмечено выше, щель в дислокационном спектре может создана коллективным воздействием на дислокацию точечных дефектов. В этом случае она определяется следующим выражением

$$\Delta = \Delta_{def} = \frac{c}{b} \sqrt[4]{n_{0d} \chi^2}, \quad (10)$$

где n_{0d} – безразмерная концентрация точечных дефектов, χ – параметр их размерного несоответствия.

Если же главный вклад в формирование спектральной щели вносит коллективное взаимодействие дислокаций, то

$$\Delta = \Delta_{dis} = \pi b \sqrt{\frac{\mu \rho}{6\pi m(1-\gamma)}}, \quad (11)$$

где μ – модуль сдвига, γ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность дислокаций в кристалле.

Динамический предел текучести металлов и сплавов равен сумме вкладов торможения дислокаций точечными дефектами, другими дислокациями кристалла и призматическими дислокационными петлями.

Проанализируем случай, когда доминирующее влияние на формирование щели оказывает коллективное взаимодействие точечных дефектов: $\Delta_{dis} < \Delta_{def}$. Такое доминирование имеет место при значениях $\rho \leq 10^{14} \text{м}^{-2}$, $n_{od} = 10^{-2} - 10^{-4}$ и скоростях пластической деформации $\dot{\epsilon} < \rho b^2 \Delta_{def}$, при которых взаимодействие точечных дефектов с дислокацией имеет коллективный характер. Это скорости $\dot{\epsilon} = 10^4 - 10^5 \text{с}^{-1}$. Отметим, что при таких скоростях динамическое торможений дислокаций призматическими петлями имеет характер сухого трения. Выполняя необходимые математические преобразования, получим выражение для динамического предела текучести облученного металла в следующем виде

$$\tau = \alpha \mu b \sqrt{\rho} + D \frac{n_L R}{\sqrt[4]{n_{od} \chi^2}} + K \sqrt{n_{od} \chi^2}, \quad (12)$$

$$K = \frac{2(1-\gamma)\mu\dot{\epsilon}}{\rho^2 b^3 c}, \quad D = \frac{\mu b^2}{(1-\gamma)^2}. \quad (13)$$

Анализ полученного выражения показывает, что зависимость динамического предела текучести облученного металла от концентрации точечных дефектов является немонотонной и имеет минимум, положение которого определяется выражением

$$n_{min} = \left(\frac{\rho R c n_L b^3}{\dot{\epsilon} \sqrt{\chi}^3} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (14)$$

Полученный результат согласуется с выводом теории ДВД, согласно которому минимум на зависимости механических свойств от характеристик материала наблюдается при смене доминирующей силы торможения. В нашем случае в точке минимума имеет место переход от доминирования торможения дислокаций

призматическими дислокационными петлями к доминированию торможения точечными радиационными дефектами.

Для значений $b = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $\gamma = 0,3$, $\chi = 10^{-1}$, $R = 10b$, $n_L = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $\rho = 10^{13} \text{ м}^{-2}$, $c = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $\dot{\epsilon} = 10^4 \text{ с}^{-1}$ получим $n_{min} = 10^{-2}$

Заключение

Призматические дислокационные петли и точечные дефекты, в большом количестве возникающие при облучении металлов и сплавов, оказывают огромное влияние на формирование механических свойств этих материалов в условиях высоких нагрузок. Они являются причиной возникновения немоной зависимости динамического предела текучести металлов и сплавов от концентрации точечных дефектов.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе высокоскоростной деформации облученных металлов и сплавов.

Список литературы

1. Abernethy R. G., Gibson I. S. K.-L, Giannattasio A. Effects of neutron irradiation on the brittle to ductile transition in single crystal tungsten // Journal of nuclear materials. 2019. 527. 151799.
2. Prabhakaran S., Kulkarni A., Vasanth G. Laser shock peening without coating induced residual stress distribution, wettability characteristics and enhanced pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel // Applied surface science. 2017. 428. 17–30.
3. Li P., Susmel L., Ma M. The life prediction of notched aluminum alloy specimens after laser shock peening by TCD // International journal of fatigue. 2023. 176. 107795.
4. Smith R. F., Eggert J. H., Rudd R. E., Swift D. C., Bolme C. A., Collins G. W. High strain-rate plastic flow in Al and Fe Collins // Journal of applied physics. 2011. 110. 123515 (1–11).
5. Tapasa K., Bacon D. J. and Osetsky Yu. N. Computer simulation of dislocation–solute interaction in dilute Fe–Cu alloys // Modelling and simulation in materials science and engineering. 2006.14. 1153–1166.
6. Fan H., El-Awady J. A., Wang Q., Raabe D., Zaiser M. Strain rate dependency of dislocation plasticity // Nature communications. 2021. 12 (1). 1–11. DOI: 10.1038/s41467-021-21939-1
7. Малашенко В. В. Влияние плотности дислокаций на динамический предел текучести облученных металлов с гигантской магнитострикцией // Физика твердого тела. 2024. 66 (8). 1403–1407. DOI: 10.61011/FTT.2024.11.59336.246
8. Варюхин В. Н., Малашенко В. В. Динамические эффекты в дефектной системе кристалла // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. 82 (9). 1213–1218. DOI: 10.1134/S0367676518090259
9. Malashenko V. V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // Physica B condensed matter. 2009. 404 (21). 3890–3893. DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.122

10. Косевич А. М. Дислокации в теории упругости. Киев: Наукова думка, 1978. 220 с.

References

1. Abernethy R. G., Gibson I. S. K.-L, Giannattasio A. Effects of neutron irradiation on the brittle to ductile transition in single crystal tungsten // Journal of nuclear materials. 2019. 527. 151799.
2. Prabhakaran S., Kulkarni A., Vasanth G. Laser shock peening without coating induced residual stress distribution, wettability characteristics and enhanced pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel // Applied surface science. 2017. 428. 17–30.
3. Li P., Susmel L., Ma M. The life prediction of notched aluminum alloy specimens after laser shock peening by TCD // International journal of fatigue. 2023. 176. 107795.
4. Smith R. F., Eggert J. H., Rudd R. E., Swift D. C., Bolme C. A., Collins G. W. High strain-rate plastic flow in Al and Fe Collins // Journal of applied physics. 2011. 110. 123515 (1–11).
5. Tapasa K., Bacon D. J. and Osetsky Yu. N. Computer simulation of dislocation–solute interaction in dilute Fe–Cu alloys // Modelling and simulation in materials science and engineering. 2006. 14. 1153–1166.
6. Fan H., El-Awady J. A., Wang Q., Raabe D., Zaiser M. Strain rate dependency of dislocation plasticity // Nature communications. 2021. 12 (1). 1–11. DOI: 10.1038/s41467-021-21939-1
7. Malashenko V. V. Influence of the misfit parameter of point defects on the dynamic yield strength of metals and alloys // Physics of the solid state. 2024. 66 (8). 1403–1407. DOI: 10.61011/FTT.2024.11.59336.246
8. Varyukhin V. N., Malashenko V. V. Dynamic effects in a defective system of crystal // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: physics. 2018. 82 (9). 1101–1105. DOI: 10.3103/S1062873818090253
9. Malashenko V. V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // Physica B condensed matter. 2009. 404 (21). 3890–3893. DOI: 10.1016/j.physb.2009.07.122
10. Kosevich A. M. Dislocations in the theory of elasticity. Kiev: Nauchnaya dumka Publ., 1978. 220 p.

Информация об авторе

Малашенко Вадим Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия), ORCID: 0000-0001-7073-8762, malashenko@donfti.ru

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 623.746.4-519:621.395.64

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).408-421

Поступила в редакцию / Received 05.05.2025

ГРНТИ 49.43.29+49.37.33

Специальность ВАК 2.2.13.

Принята к публикации / Accepted 28.09.2025

Научная статья

АЛГОРИТМ ВЗЛЕТА И РАЗМЕЩЕНИЯ РОЯ БПЛА

Иванов В. С., Грачев. Н. Н., Шеденко В. В.

МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия)

Аннотация. В статье проведен анализ отечественных беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа, используемых в качестве ретрансляторов связи. Представлены достоинства и недостатки каждого решения. Целью работы является оперативное развертывание системы связи в заданной территории путем разработки алгоритма взлета и размещения роя беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены ручной и автоматический режимы управления квадрокоптерами. Описаны датчики, использующиеся при управлении квадрокоптером в автоматическом режиме. Рассмотрена технология роя беспилотных летательных аппаратов, позволяющая покрыть связью большие территории. Разработанный алгоритм взлета и размещения роя беспилотных летательных аппаратов будет применяться при оперативной организации связи на территориях страны, где нет средств радиоэлектронной борьбы. Применение квадрокоптеров в качестве ретрансляторов связи позволяет в кратчайшие сроки развернуть систему связи в ситуациях, в которых установка ретрансляторов на опоры невозможна в силу сложного рельефа местности или не оправдана с экономической точки зрения. Представлены результаты моделирования разработанного для размещения наземных базовых станций программного обеспечения, которое будет адаптировано под размещение беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, квадрокоптеры, рой БПЛА, ретранслятор связи

Для цитирования: Иванов В. С., Грачев Н. Н., Шеденко В. В. Алгоритм взлета и размещения роя БПЛА // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 408–421. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).408-421

Research Article

ALGORITHM FOR TAKE-OFF AND DEPLOYMENT OF A UAV SWARM

Ivanov V. S., Grachev N. N., Shedenko V. V.

MIREA – Russian technological university (Moscow, Russia)

Abstract. The article presents an analysis of domestic multirotor-type unmanned aerial vehicles used as communication relays. The advantages and disadvantages of each solution are described. The purpose of our work is to explore the rapid deployment of a communication system in a designated area by developing an algorithm for the takeoff and deployment of a UAV swarm. Both manual and automatic modes of quadcopter control are considered. We not only described the sensors used in automatic quadcopter control, but also examined UAV swarm technology, which makes it possible to provide communication coverage over large areas. The developed algorithm for the takeoff and deployment of a UAV swarm will be applied for the rapid organization of communications in regions of the country where electronic warfare systems are absent. The use of quadcopters as communication relays enables the swift deployment of communication systems in situations where installing relay equipment on fixed supports is impossible due to difficult terrain or unjustified from an economic standpoint. The results of software simulation developed for the deployment of ground base stations, which will be adapted for UAV deployment, are presented.

Keywords: unmanned aerial vehicles, quadrocopters, a swarm of UAVs, a communications repeater

For citation: Ivanov V. S., Grachev N. N., Shedenko V. V. Algorithm of take-off deployment of a UAV swarm // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 408–421. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).408-421

Введение

Идея использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве альтернативы наземным базовым станциям и ретрансляторам не является новой. Разные страны на протяжении последних 10 лет ведут работы в этом направлении, проектируются новые БПЛА, разрабатываются алгоритмы взаимодействия между ними, адаптируются под задачу размещения БПЛА в воздухе известные алгоритмы (муравьиный, пчелиный, жадный и т.д.). Конечно, полностью заменить наземные станции не получится в силу ограниченного времени нахождения БПЛА в воздухе, но с их помощью появляется возможность оперативного развертывания системы связи в требуемых местах, будь то зона чрезвычайной ситуации или проведение исследовательских работ. В данной статье рассматриваются именно квадракоптеры, которые могут зависать в определенной точке на некоторое время.

Сравнение отечественных образцов

Рассмотрим подробнее известные на данный момент отечественные решения.

1. Опытный образец дрона-ретранслятора «Настасья», разработанный «Обуховским заводом», впервые представлен на Национальной выставке и форуме инфраструктуры гражданской авиации NAIS-2024. Дрон имеет возможность вертикального взлета и посадки, как квадракоптер, но при этом оснащен самолетным крылом для повышения скорости и дальности полета. БПЛА выполняет роль ретранслятора между оператором и ударным или разведывательным дроном. «Настасья» (рисунок 1) отличается высокой скоростью полета, достигающей 100 км/ч, и большим радиусом действия – до 100 км. Безусловно, данный дрон не является именно квадракоптером, но за счет наличия вертикального взлета и посадки, представлен в данном обзоре [1].



Рисунок 1. Дрон-ретранслятор «Настасья»

2. В конце 2023 г. специалистами Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН (СПб ФИЦ РАН) разработан специализированный БПЛА «Ворон» (рисунок 2), предназначенный для расширения зоны беспроводной связи, не охваченной другими видами связи. Для удобного управления квадрокоптером создан специальный шлем, на который выводится картинка с камеры и джойстика. Вместе с полезной нагрузкой до 2 кг «Ворон» может находиться в воздухе до 30 минут [2].



Рисунок 2. Квадрокоптер «Ворон»

3. Беспилотный многофункциональный летательный аппарат вертикального взлета и посадки «Гранад ВА-1000» от компании «ЮВС Авиа» (рисунок 3). Данный БПЛА предназначен для решения широкого спектра задач: мониторинг закрепленных территорий, поисково-спасательные операции, ретрансляция сигналов. Также существует привязной вариант данного БПЛА «Гранад ВА-1000ПП», который использует кабель для передачи электропитания. «Гранад ВА-1000» отличается продолжительным временем полета – до 90 минут при весе полезной нагрузки – до 2,5 кг [3].



Рисунок 3. Квадрокоптер «Гранад ВА-1000»

4. Квадрокоптер «Бласкор» компании «Беспилотные летательные аппараты» (рисунок 4) предназначен для визуального наблюдения за объектами с воздуха. При этом спектр его применения ограничен только максимальной полезной нагрузкой – 2 кг при максимальном времени полета – 30 минут. Управление аппаратом осуществляется с помощью стационарной, передвижной или носимой станции управления [4].



Рисунок 4. Квадрокоптер «Бласкор»

5. Мультикоптер «Нелк» (рисунок 5) предназначен для воздушной разведки местности, ретрансляции радиосигналов, доставки и сброса малогабаритных грузов. Управление полетом беспилотного воздушного судна (БВС) осуществляется с наземного пункта управления (НПУ) оператором в автоматическом или полуавтоматическом режиме с возможностью корректировки параметров полета и режимов работы целевых нагрузок. Максимальное время полета при весе полезной нагрузки 3 кг составляет 40 минут [5].



Рисунок 5. Мультикоптер «Нелк»

В таблице 1 представлены характеристики рассмотренных БПЛА. Из приведенных данных видно, что максимальное время нахождения в воздухе

с полезной нагрузкой не превышает 90 минут, а максимальная масса полезной нагрузки составляет 3 кг. Указанные параметры наиболее сильно влияют на решение задачи оперативного покрытия заданной территории связью. Если время, в течение которого необходимо обеспечить связь, превышает указанные значения, то БПЛА отправляется в базовую точку с целью смены аккумулятора, при этом оставляя без связи определенную территорию. Прежде чем перейти к алгоритму взлета и нахождения роя БПЛА в воздухе, рассмотрим подробнее способы управления квадрокоптерами.

Таблица 1. Характеристики отечественных квадрокоптеров-ретрансляторов

Наименование	Радиус действия, км	Максимальная полезная нагрузка, кг	Максимальная скорость, км/ч	Время полета, мин
Настасья	100	3	100	Нет информации
Ворон		2		30
Гранад ВА-1000	15	2,5	54	90
Бласкор	5	2	45	30
Нелк	5	3	50	40

Способы управления роем БПЛА

Использование одного квадрокоптера для ретрансляции сигналов позволяет покрыть связью определенную территорию, не превышающую 50 км, в зависимости от типов окружающей местности, высоты полета, характеристики приемопередающего оборудования. Для покрытия связью больших территорий целесообразно применять несколько коптеров, объединенных в рой. Рой квадрокоптеров предполагает интеграцию БПЛА с полезной нагрузкой для решения различных задач [6].

В квадрокоптере установлено большое количество датчиков, которые не позволяют ему сваливаться на землю и достигать заданных пилотом точек, среди которых:

- гироскопы и акселерометры, предназначенные для регистрации положения устройства в пространстве. Они отслеживают наклон и ускорение БПЛА;
- GPS-модуль, передающий точное местоположение коптера;
- камеры и датчики расстояния, предназначенные для распознавания и обигания препятствий;
- барометр и ультразвуковые сенсоры, контролирующие высоту и стабилизирующие полет.

Управление БПЛА осуществляет оператор в ручном режиме или режиме автопилот. При ручном управлении оператор управляет квадрокоптером напрямую. GPS, данные с компьютерного зрения и барометр не используются. Для полетов в этом режиме необходимы хорошие навыки пилотирования коптеров.

В режиме автопилота показатели со всех датчиков анализируются и передаются команды двигателям. Простой пример: во время зависания коптера на месте сбоку подул ветер. Автопилот меняет обороты пропеллеров, чтобы коптер находился на месте. Данный режим облегчает работу оператора и, например, позволяет не контролировать наклон коптера, анализируя направление ветра. При этом работа оператора ничуть не обесценивается, так как во время полета может сломаться какой-то датчик, и тогда автопилот не сможет корректно справляться со своими задачами.

В режиме автопилот коптер выполняет заранее загруженную в квадрокоптер миссию, которая загружается через специальные приложения, например, QGroundControl, MAVROS. Квадрокоптер будет следовать по заранее запрограммированному сценарию, хранящемуся в памяти автопилота (рисунок 6).

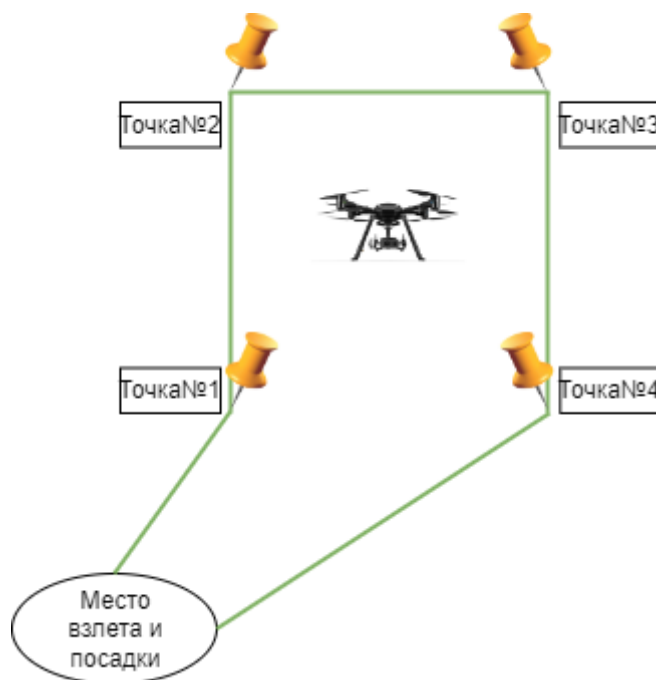


Рисунок 6. Режим полета квадрокоптера «по точкам»

У каждого производителя есть определенные режимы работы для своих моделей. Например, у мультикоптера «Нелк» существуют следующие режимы работы:

1. Автоматический – оператор задает полетную программу на наземной станции управления (ноутбуке); без пульта управления в автоматическом режиме от взлета до посадки осуществляется полет по заданному маршруту различной конфигурации с учетом рельефа местности.

2. Полуавтоматический (директорный) – оператор имеет возможность изменять высоту, скорость, направление полета БВС пультом ручного управления; стабилизация БВС осуществляется автоматически.

3. Управление одной кнопкой – оператор вводит полетную программу непосредственно в бортовую систему БВС при выключенном наземном пункте управления. Полет БВС выполняется при полном радиомолчании.

4. Следование за радиомаяком – выполняется автоматический полет БВС на заданном оператором удалении и высоте от объекта, на которой установлен радиомаяк.

Технология роя – это один из самых впечатляющих аспектов современного развития коптеров. Каждый коптер, работающий в рое, отслеживает положение соседей и корректирует свое поведение, чтобы вся группа двигалась синхронно и эффективно. Это называется децентрализованное управление, когда нет одного лидера, а все участники принимают решения исходя из поведения друг друга. Существуют также и другие варианты управления, например централизованное или сеть Adhoc [7]. Управление роем дронов – это технически сложная задача. Координация множества дронов требует мощных алгоритмов, которые способны учитывать множество переменных: скорость ветра, препятствия, возможность потери связи [8]. Использование нескольких квадрокоптеров позволяет обеспечить связью большую территорию (рисунок 7). При этом БПЛА необходимо заменять, так как ресурс батареи ограничен. Разработка алгоритма запуска и взаимозаменяемости БПЛА является актуальной задачей.

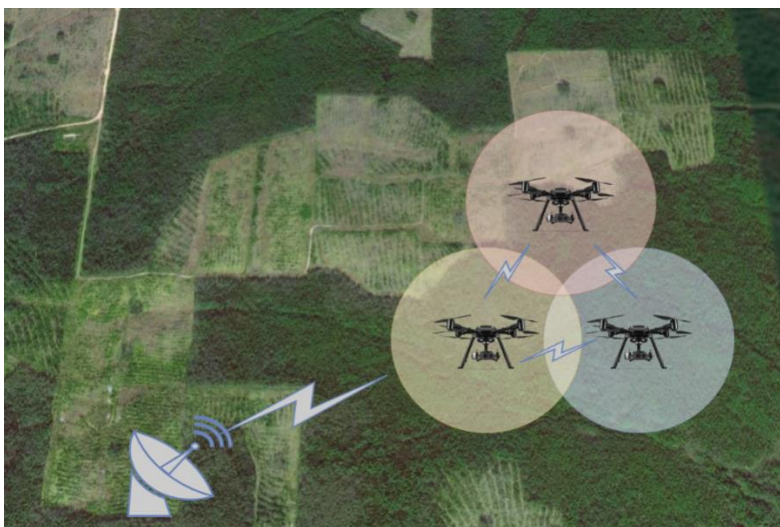


Рисунок 7. Покрытие связью роем БПЛА заданной территории

Рассчитать зоны покрытия связью БПЛА можно, используя статистические модели расчета зон покрытия, среди которых выделим следующие.

1) Модель Лонгли-Райса, созданная в 1960-х годах, которая позволяет спрогнозировать ослабление радиосигналов для телекоммуникационной линии связи в диапазоне частот от 40МГц до 100ГГц. Данная модель больше всего подходит для расчетов зоны покрытия на территориях со сложным рельефом

и плотной городской застройкой. В общем случае мощность полезного сигнала на приемной стороне можно представить в виде следующего выражения [9]:

$$P_{rx} = P_{tx} - \eta_{tx} + G_{tx} - A_0 - \eta_{rx} + G_{rx}. \quad (1)$$

2) Модель Окумура-Хата, которая основана на значительных эмпирических измерениях распространения радиосигнала в городских условиях. Стандартная формула для средних потерь на трассе в городской среде в соответствии с моделью Хата имеет вид [10]:

$$L = 69,55 + 26,16 \log_{10}(f_c) - 13,82 \log_{10}(h_r) - C_H + (44,9 - 6,65 \log_{10}(h_t)) \log_{10}(d). \quad (2)$$

3) Модель COST231-Хата, которая является расширенной версией модели Окумура-Хата. Данная модель учитывает эффективную высоту подвеса антенн БС и ПС, применяется в более высоком диапазоне частот от 1500 до 2000 МГц [11]:

$$L = 46,3 + 33,9 \log_{10}(f_c) - 13,82 \log_{10}(h_{эбс}) - a(h_{пс}) + (44,9 - 6,65 \log_{10}(h_{эбс})) \log_{10}(r) + C. \quad (3)$$

4) Модель Уолфиша-Икегами подходит для расчетов в городской среде. Потери на стороне получателя, вызванные рассеиванием радиосигнала при отражении от поверхности «конечной» улицы, на которой находится приемник [12]:

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(\Delta h m) + L_{0ri}. \quad (4)$$

Существуют также детерминированные методы, которые учитывают факторы, влияющие на препятствия на пути распространения электромагнитных волн от мобильных до базовых станций расчета зон покрытия БС, среди которых:

– рекомендация МСЭ-R Р.1812-4 «Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб из пункта в зону в диапазонах УВЧ и ОВЧ». Потери за счет дифракции вычисляются путем сочетания метода, основанного на конструкции Буллингтона, и метода расчета дифракции над сферической Землей [13].

Основные потери передачи (дБ), которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в $p\%$ местоположений, определяются выражением:

$$L_b = \max [L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I(\frac{p_l}{100}) \sigma_{loc}], \text{ [дБ]}. \quad (5)$$

Напряженность поля E_p дБ(мкВ/м), приведенная к эффективной излучаемой мощности 1 кВт, превышаемая в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений, может быть рассчитана с использованием формулы:

$$E = 199,36 + 20 \log_{10} f - L_b, \text{ [дБ(мкВ/м)]}. \quad (6)$$

– расчет зон покрытия на основе детерминированной модели напряженности поля сигнала. Дифракционные потери, вызванные одним препятствием, могут быть рассчитаны по формуле [14]:

$$a(m) = 6,4 + 20 \log_{10} (\sqrt{v^2 + 1} + v); \text{ [дБм]}, \quad (7)$$

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)}. \quad (8)$$

Напряженность поля в точке приема рассчитывается по формуле:

$$E = E_{\text{сп}} - a_{m1} - a_{m2}; \quad (9)$$

где $E_{\text{сп}}$ – напряженность поля свободного пространства; a_{m1} – дифракционные потери первого препятствия; a_{m2} – дифракционные потери второго препятствия.

Алгоритм взлета и размещения роя БПЛА

Данный алгоритм (рисунок 8) направлен на квадрокоптеры, которые управляются операторами. В дальнейшем алгоритм будет адаптирован под режим автоматического управления коптерами. На первом этапе требуется задать полетное задания для каждого квадрокоптера, указать координаты мест размещения, высоту и длительность нахождения. Затем запустить все БПЛА в указанные места. Если какой-то коптер не взлетел из-за неизвестной неисправности, то в течение 5 минут необходимо решить данную ошибку, либо заменить коптер на новый. Значение времени, затраченного на диагностику и исправление ошибки, задано как время, не превышающее 20% от максимального времени нахождения коптеров (в среднем 30 минут). Если все БПЛА смогли взлететь, но по каким-то причинам некоторые не смогли долететь до заданных точек, то неисправные коптеры возвращаются на базу и заменяются на новые.

После прибытия всех коптеров в заданные точки требуемая территория покрывается связью. Важным этапом является организация бесперебойного покрытия, в связи с чем необходимо в кратчайшие сроки организовать взаимозаменяемость беспилотников. На данном этапе логичным выглядит запуск заменяющего коптера заранее, в момент, когда у заменяемого осталось 20% заряда аккумулятора. Заменяющий коптер размещается в точке с заданными координатами,

но выше заменяемого по высоте. После того, как заменяемый коптер отправляется на базу, на его место встает заменяющий коптер. При этом успешным будет считаться результат, когда связь на определенном участке заданной территории отсутствовала менее 1 минуты.

На заключительном этапе достигается задача покрытия заданной территории связью в течение требуемого времени и рой БПЛА отправляется на базу.

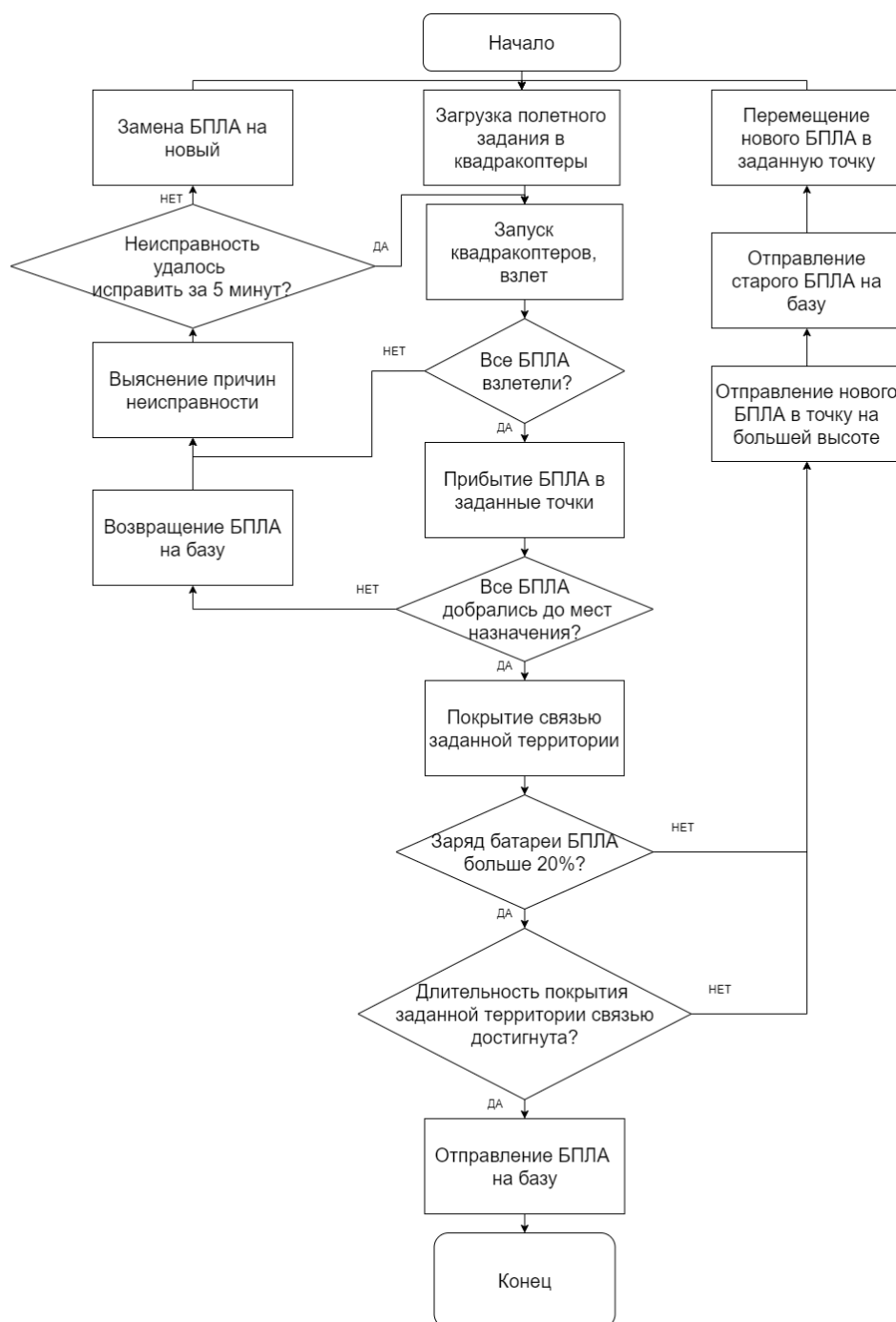


Рисунок 8. Алгоритм взлета и размещения роя БПЛА

Важным условием является то, что заданную территорию необходимо покрыть связью, используя минимальное количество квадрокоптеров. Для этого будет адаптирован и модернизирован алгоритм размещения на основе известных, например, генетического алгоритма. Также необходимо предоставить пользователю программное обеспечение, в котором он сможет ввести технические характеристики приемопередающего оборудования и получить координаты мест размещения квадрокоптеров (рисунок 9). Решая в диссертационном исследовании задачу размещения базовых станций транкинговых систем связи, одним из авторов было разработано программное обеспечение, которое при небольшой доработке будет адаптировано под размещения роя БПЛА. В данном ПО пользователь имеет возможность указать следующие параметры:

- территорию, которую необходимо обеспечить связью;
- мощность передатчиков базовой и портативной (абонентской) станций (дБм);
- чувствительность приемников базовой и портативной (абонентской) станций (мкВ);
- высоту подвеса антенны базовой и портативной (абонентской) станций (м);
- количество абонентов сети (чел);
- частотный ресурс;
- коэффициент усиления антенн базовой и портативной (абонентской) станций;
- затухания в фидере.

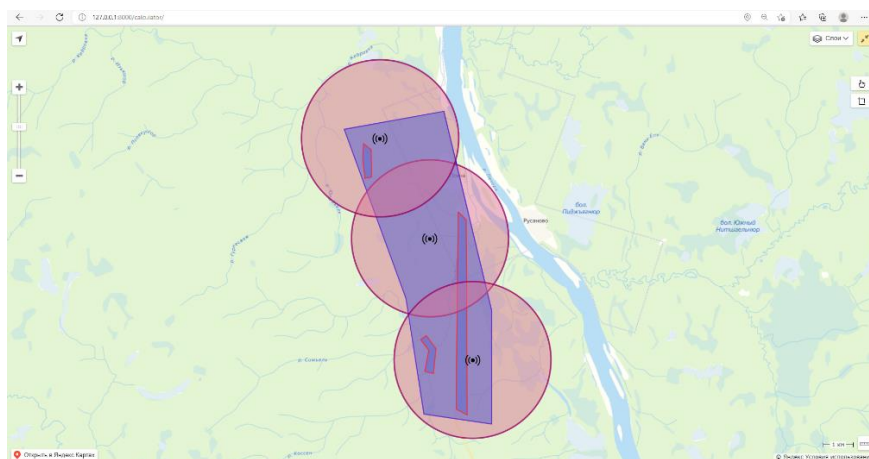


Рисунок 9. Скриншот из разработанного программного обеспечения

Результатом моделирования являются координаты мест размещения базовых станций. Зоны покрытия рассчитываются по модифицированной модели COST231-Хата и имеют разного размера формы (радиусы) [15].

Заключение

Безусловно, наземные базовые станции, стационарные ретрансляторы не утратили и не утратят в будущем своей популярности. Важно разрабатывать альтернативные способы установки приемопередающего оборудования, т. к. не всегда возможно установить вышки. В случаях, когда связь необходимо организовать на непродолжительный период времени, установка вышки является нецелесообразным и дорогим решением. Стоимость установки мачты высотой 40 м варьируется от 3–4 млн рублей, нужно также учесть время, затраченное на установку мачты. Решение с квадракоптером позволяет сэкономить время и деньги, используя БПЛА в различных местах, требующих организации связи.

Применение квадракоптеров в качестве носителей приемопередающего оборудования является хорошим вариантом, позволяющим покрыть связью большие территории из-за возможности взлета на разные высоты. При данном способе организации связи есть свои ограничения по максимальной полезной нагрузке квадракоптера, максимальном времени нахождения в воздухе и, конечно, стоимости БПЛА. Если говорить про организацию связи в приграничных территориях либо в территориях проведения военных операций, то серьезным ограничением являются комплексы радиоэлектронной борьбы. Данный вопрос требует отдельной проработки.

Список литературы

1. «Алмаз-Антей» разработал дрон для ретрансляции сигнала // РИА Новости: сайт. 2024, 6 февраля. URL: <https://ria.ru/20240206/dron-1925621328.html?ysclid=m85gq7cu0919202502> (Дата обращения: 02.03.2025).
2. Исследователи СПб ФИЦ РАН разработали дрон, позволяющий оперативно расширить территорию покрытия беспроводной связью // СПб ФИЦ РАН: сайт. 2023, 11 июля. URL: https://spcras.ru/news/detail_news.php?ID_NEWS=650116 (Дата обращения: 02.03.2025).
3. Гранада BA-1000 // Drone-catalog: сайт. URL: <https://drone-catalog.ru/product/%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%B4-%D0%B2%D0%B0-1000/?ysclid=m85hs5e9vn828937895> (Дата обращения: 02.03.2025).
4. Drone-catalog: Блэскор. URL: <https://drone-catalog.ru/product/%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80/?ysclid=m85i5odpjb852330049> (Дата обращения: 02.03.2025).
5. НЕЛК: нестандартная электроника: официальный сайт. URL: https://nelk.ru/catalog/robototekhnicheskie_sistemy/bespilotnye_aviatsionnye_sistemy/nelk_v6_m1/?ysclid=m85n42gdq3920288803 (Дата обращения: 02.03.2025).
6. Как дроны роя в Китае общаются друг с другом? URL: <https://www.iwavecomms.com/ru/news/how-do-china-swarming-drones-communicate-with-each-other/> (Дата обращения: 04.03.2025).
7. Довгаль В. А. Интеграция сетей и вычислений для построения системы управления роем дронов как сетевой системы управления // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4. Естественно-математические и технические науки. 2022. 1 (296). 62–76. DOI: 10.53598/2410-3225-2022-1-296-62-76

8. Как работает «мозг» дрона? Алгоритм управления // LIVE: сайт. 2024, 26 ноября. URL: <https://www.ixbt.com/live/drones/kak-rabotaet-mozg-drona-algoritm-upravleniya.html?ysclid=m8h32q4a4i859191366> (Дата обращения: 04.03.2025).
9. Perez-Fontan F., Hernando-Rabanos J. M. Comparison of irregular terrain propagation models for use in digital terrain data based radiocommunication system planning tools // IEEE Transactions on Broadcasting. 1995. 41 (2). 63–68. DOI: 10.1109/11.392833
10. Дворников С. В., Балыков А. А., Котов А. А. Упрощенная модель расчета потерь сигнала в радиолинии, полученная путем сравнения квадратичной формулы Введенского с существующими эмпирическими моделями // Системы управления, связи и безопасности. 2019. 2. 87–99. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10204
11. Кисель Н. Н. Моделирование распространения радиоволн в пакете Wireless InSite: учебное пособие. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. 107 с.
12. Владимиров С. С. Беспроводные системы передачи данных. Расчет потерь на трассе радиоканала: практикум. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2020. 32 с.
13. Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб «из пункта в зону» в диапазонах УВЧ и ОВЧ: рекомендация МСЭ-R P.1812-4. Женева: Международный союз электросвязи, 2015. 34 с.
14. Бабков В. Ю., Вознюк М. А., Михайлов П. А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. 2-е изд., испр. Москва: Горячая линия–Телеком, 2007. 224 с.
15. Иванов В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А. Алгоритм автоматического размещения базовых станций транкинговых систем связи // Труды учебных заведений связи. 2023. 9 (5). 25–34. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-5-25-34

References

1. RIA Novosti: Almaz-Antey has developed a drone for signal relay. URL: <https://ria.ru/20240206/dron-1925621328.html?ysclid=m85gq7cu0919202502> (Accessed: 02.03.2025). (In Russian).
2. St. Petersburg FIT RAS: Researchers at St. Petersburg FIT RAS have developed a drone that allows for rapid expansion of the wireless coverage area. URL: https://spcras.ru/news/detail_news.php?ID_NEWS=650116 (Accessed: 02.03.2025). (In Russian).
3. Drone-catalog: Granada VA-1000. URL: <https://drone-catalog.ru/product/%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%B4-%D0%B2%D0%B0-1000/?ysclid=m85hs5e9vn828937895> (Accessed: 02.03.2025). (In Russian).
4. Drone-catalog: Blascor. URL: <https://drone-catalog.ru/product/%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80/?ysclid=m85i5odpju852330049> (Accessed: 02.03.2025). (In Russian).
5. NELK: unusual electronics official website. URL: https://nelk.ru/catalog/robototekhnicheskie_sistemy/bespilotnye_aviatsionnye_sistemy/nelk_v6_m1/?ysclid=m85n42gdq3920288803 (Accessed: 02.03.2025). (In Russian).
6. How do swarm drones in China communicate with each other? URL: <https://www.iwavecomms.com/ru/news/how-do-china-swarming-drones-communicate-with-each-other/> (Accessed: 04.03.2025). (In Russian).
7. Dovgal V. A. Integration of networks and computing to build a drone swarm management system as a network management system // The Bulletin of the Adyghe

State University, the series “Natural-Mathematical and Technical Sciences”. 2022. 1 (296). 62–76. DOI: 10.53598/2410-3225-2022-1-296-62-76 (In Russian).

8. How does the drone's "brain" work? The control algorithm. URL: <https://www.ixbt.com/live/drones/kak-rabotaet-mozg-drona-algoritm-upravleniya.html?ysclid=m8h32q4a4i859191366> (Accessed: 04.03.2025). (In Russian).

9. Perez-Fontan F., Hernando-Rabanos J. M. Comparison of irregular terrain propagation models for use in digital terrain data based radiocommunication system planning tools // IEEE Transactions on Broadcasting. 1995. 41 (2). 63–68. DOI: 10.1109/11.392833

10. Dvornikov S. V., Balykov A. A., Kotov A. A. The simplified model for radio signal path loss computation, which was developed by comparing the Vvedensky quadratic equation with existing empirical models // Systems of control, communication and security. 2019. 2. 87–99. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10204 (In Russian).

11. Kisel N. N. Modeling of radio wave propagation in the Wireless InSite package: a textbook. Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Publ., 2018. 107 p. (In Russian).

12. Vladimirov S. S. Wireless data transmission systems. Calculation of losses on the radio channel route: a practical guide. St. Petersburg: SPbSUT Publ., 2020. 32 p.

13. Recommendation ITU-R P.1812-4. A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the UHF and VHF bands. Geneva: ITU Publ., 2015. 34 p.

14. Babkov V. Yu., Voznyuk M. A., Mikhailov P. A. Mobile communication networks. Frequency-territorial planning. 2nd ed., revised. Moscow: Hotline–Telecom Publ., 2007. 224 p. (In Russian).

15. Ivanov V. S., Uvajsov S. U., Ivanov I. A. Automatic placement algorithm of base stations trunking communication systems // Proceedings of telecommunication universities. 2023. 9 (5). 25–34. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-5-25-34 (In Russian).

Информация об авторах

Иванов Вячеслав Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9827-1690, ivanov_vs@mirea.ru

Грачев Николай Николаевич – кандидат технических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0547-0899, grachev_n@mirea.ru

Шеденко Владимир Вячеславович – студент, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0009-0007-2833-6277, shedenkovv@mail.ru

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.874.4

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).422-441

Поступила в редакцию / Received 30.06.2025

ГРНТИ 47.49.27

Специальность ВАК 2.2.13.; 2.2.16.

Принята к публикации / Accepted 24.09.2025

Научная статья

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

Михайлов В. Н.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
имени В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия)*

Аннотация. Интенсивность отраженных от морской поверхности сигналов зависит от большого количества различных факторов, определяемых как конструкцией радиотехнического средства, так и состоянием моря. Основным параметром, определяющим интенсивность отражения, является удельная эффективная поверхность рассеяния морской поверхности. В статье рассмотрены различные модели удельной эффективной поверхности рассеяния для малых углов скольжения, при различных условиях наблюдения, показаны границы их применимости. Произведен анализ точности относительно экспериментальных данных. На основе расчетов автор представил достаточно прозрачную методику оценки соответствия результатов использования моделей полученным эмпирическим данным.

Ключевые слова: *удельная эффективная поверхность рассеяния, морская поверхность, модель отражения, угол скольжения, угол визирования*

Для цитирования: Михайлов В. Н. Обзор моделей удельной эффективной поверхности рассеяния морской поверхности при малых углах скольжения // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 422–441. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).422-441

Research Article

REVIEW OF THE SEA NORMALIZED RADAR REFLECTIVITY AT LOW GRAZING ANGLES

Mikhailov V. N.

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (Saint Petersburg, Russia)

Abstract. The intensity of the signals reflected from the sea surface depends on the sea state, collection geometry, wind speed, direction, and radar frequency. The main parameter determining the intensity of reflection is the sea normalized radar reflectivity. The article discusses various models mean backscatter models at low grazing angles, under different observation conditions, and shows the limits of their applicability. The accuracy of the experimental data is analyzed. Based on the calculations, the author presented a fairly transparent methodology for assessing the compliance of the results of using models with the empirical data obtained.

Keywords: *normalized radar reflectivity, mean backscatter models, sea state, grazing angle, wind aspect*

For citation: Mikhailov V. N. Review of the sea normalized radar reflectivity at low grazing angles // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 422–441. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).422-441

Введение

На сегодняшний день существуют достаточно много моделей удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) морской поверхности, большинство из которых построены на основе экстраполяции экспериментальных данных. В прошлом проводилось много экспериментальных исследований по измерению УЭПР морской поверхности, наиболее обширные результаты были представлены в [1]. В литературе они получили название таблиц Натансона.

Если обратиться к обзорам моделей УЭПР за последних десять лет, например, [2–7] и др., то можно выделить несколько часто используемых. Сравним наиболее известные модели удельной ЭПР взволнованной морской поверхности при малых углах скольжения. Сначала определимся, какие углы будем считать малыми. Для этого обратимся к зависимости удельной ЭПР от угла скольжения. Эта зависимость имеет сложную форму и условно разделяется на три области: область квазизеркального отражения, область плато и область интерференции [3, 8, 9]. Также эти области называются областями больших, средних и малых углов [3, 4]. Все указанные источники сходятся в том, что границей между большими и средними углами является переходный угол, примерно равный 60 градусам. Критический угол, разделяющий средние и малые углы, зависит от длины радиоволны и высоты морских волн [9]. В [3, 4] указано, что критический угол приблизительно равен 10 градусам, источник [8] соглашается с ними, но отмечает, что он зависит от волнения моря. В статье также будем считать, что малые углы скольжения простираются до 10 градусов, что, как будет показано в дальнейшем, хорошо соотносится с областью применения моделей.

Заметим, что в литературе часто возникает путаница из-за того, что существует несколько шкал оценки интенсивности морского волнения. Большинство существующих моделей удельной ЭПР морской поверхности, как и экспериментальные данные Натансона используют оценку волнения по шкале Дугласа. Она интересна тем, что не только оценивает волнение, но и показывает его связь с параметрами ветра. В дальнейшем также будем придерживаться этой шкалы (таблица 1) [1, 8]. При составлении таблиц Натансона, а также в некоторых других источниках шкала Дугласа была дополнена состоянием моря в ноль баллов, которая соответствует значимой высоте волн менее 0,25 футов (8 см) и скорости ветра менее 4 узлов (2 м/с) [1, 10, 11]. В оригинальной шкале значения высоты волн и скорости ветра приведены в футах и узлах, соответственно. Для удобства в таблице 1 эти значения приведены так же в международной системе исчисления.

Таблица 1. Интенсивность волнения по шкале Дугласа

Состояние моря, баллы	Описание волнения	Значимая высота волн		Скорость ветра		Разгон ветра		Время действия ветра, часы
		футы	метры	узлы	метры в секунду	морские мили	километры	
1	Отсутствует	< 1	< 0,3	0 – 6	0 – 3,1			
2	Слабое	1 – 3	0,3 – 0,9	6 – 12	3,1 – 6,2	50	93	5
3	Умеренное	3 – 5	0,9 – 1,5	12 – 15	6,2 – 7,7	120	222	20
4	Жесткое	5 – 8	1,5 – 2,4	15 – 20	7,7 – 10,3	150	278	23
5	Очень жесткое	8 – 12	2,4 – 3,7	20 – 25	10,3 – 12,9	200	370	25
6	Сильное	12 – 20	3,7 – 6,1	25 – 30	12,9 – 15,4	300	556	27
7	Очень сильное	20 – 40	6,1 – 12,2	30 – 50	15,4 – 25,7	500	926	30
8	Исключительное	> 40	> 12,2	> 50	> 25,7	700	1296	35

Описание моделей

RRE (Royal Radar Establishment) model была разработана в 70-х годах 20 века в исследовательском центре Объединенного Королевства «Royal Radar Establishment». В 1974 году результаты исследований были сведены в работу «RRE σ_0 sea clutter model», которая так и не была опубликована [8]. Модель охватывает частотный диапазон от 9 до 10 ГГц при углах скольжения до 10 градусов.

$$\sigma_{RRE}^0 = \begin{cases} a_{RRE} + b_{RRE} \log_{10}(\Theta_d), & \Theta_d \leq 1^\circ \\ a_{RRE} + c_{RRE} \log_{10}(\Theta_d), & 1^\circ < \Theta_d < 10^\circ \end{cases} \quad (1)$$

где σ_{RRE}^0 – удельная ЭПР морской поверхности в децибелах, $a_{RRE}, b_{RRE}, c_{RRE}$ – коэффициенты, зависящие от состояния моря и поляризации (таблица 2), Θ_d – угол скольжения в градусах.

Таблица 2. Коэффициенты модели RRE

Поляризация	Коэффициенты	Состояние моря (SS), баллы					
		1	2	3	4	5	6
Вертикальная	a_{RRE}	-52	-46	-42	-39	-37	-35,5
	b_{RRE}	21	17,5	12,5	10,5	7	3,5
	c_{RRE}	1,015	3,39	2,03	1,35	2,03	2,37
Горизонтальная	a_{RRE}	-51,5	-45,5	-41	-38,5	-36	-34,5
	b_{RRE}	15	12	11,5	11	9,5	8
	c_{RRE}	8,2	9,5	8	7,5	7	6,5

Формула (1) позволяет вычислить среднее значение удельной ЭПР. В случае зондирования против ветра значение σ_{RRE}^0 увеличивается на 3 дБ, при зондировании по ветру – уменьшается на 3 дБ. На рисунке 1 показано сравнение данных из таблиц Натансона и модели RRE при различном волнении (SS). Сплошными линиями показаны значения, полученные с помощью модели RRE, крестиками – данные Натансона.

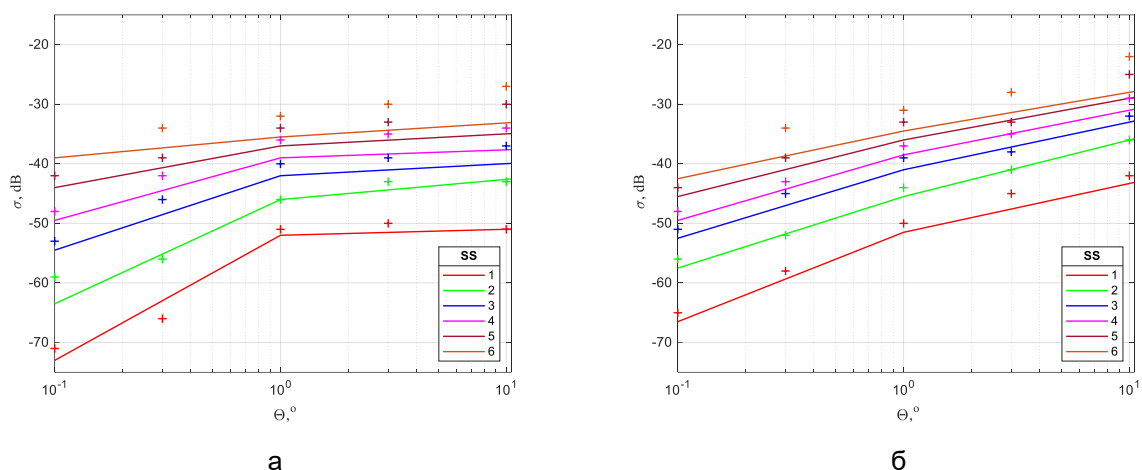


Рисунок 1. Сравнение данных Натансона и модели RRE:
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

Sittrop's model предложена в 1977 году [12]. Она позволяет рассчитать среднюю ЭПР при углах скольжения $0,1^\circ < \Theta < 10^\circ$ в диапазонах волн X (9-12 ГГц) и Ku (12–18 ГГц).

$$\sigma_{Sit}^0 = a_{Sit} + b_{Sit} \log_{10} \left(\frac{\Theta_d}{\Theta_0} \right) + \left(c_{Sit} \log_{10} \left(\frac{\Theta_d}{\Theta_0} \right) + d_{Sit} \right) \log_{10} \left(\frac{U}{U_0} \right),$$

где σ_{Sit}^0 – удельная ЭПР морской поверхности в децибелах, $a_{Sit}, b_{Sit}, c_{Sit}, d_{Sit}$ – коэффициенты, зависящие от состояния моря, поляризации, скорости и направления ветра (таблица 3), Θ_d – угол скольжения в градусах, U – скорость ветра м/с, $\Theta_0 = 0,5$, $U_0 = 5$ м/с – эталонные угол скольжения и скорость ветра, соответственно [2].

Таблица 3. Коэффициенты модели Ситтропа

Частотный диапазон	Поляризация	Направление зондирования	a_{Sit}	b_{Sit}	c_{Sit}	d_{Sit}
X	вертикальная	против ветра	-50	12,6	-13,2	34
		поперек ветра	-53	6,5	0	34
	горизонтальная	против ветра	-49	17	-12,4	30
		поперек ветра	-58	19	-33	50
Ku	вертикальная	против ветра	-46	13,6	-10	26
		поперек ветра	-48	13	-6,6	21
	горизонтальная	против ветра	-46	17	-9	22
		поперек ветра	-47	13	-8,4	22

Скорость ветра в соответствии со шкалой Дугласа до состояния сильного волнения хорошо аппроксимируется степенной функцией. Часто в литературе используется аппроксимация вида: $U = 3.16 \cdot SS^{0.8}$ [2] (красная линия на рисунке 2).

Однако лучшее приближение обеспечивает следующее соотношение:

$$U = 2.15 \cdot SS^{1.04}, \quad (2)$$

использованное при расчетах в [10] (синяя линия). При моделировании так же будем использовать это соотношение. Черными треугольниками показаны граничные значения скорости ветра в соответствии со шкалой Дугласа, черными кругами – среднее ее значение.

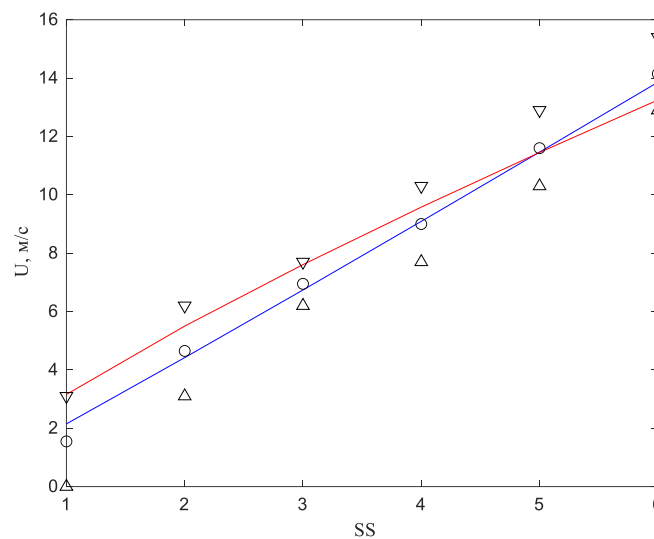


Рисунок 2. Связь используемой при расчетах скорости ветра с состоянием моря

На рисунках 3 и 4 показано сравнение данных Натансона и модели Ситтропа при зондировании поперек ветра для диапазонов X и Ku, соответственно.

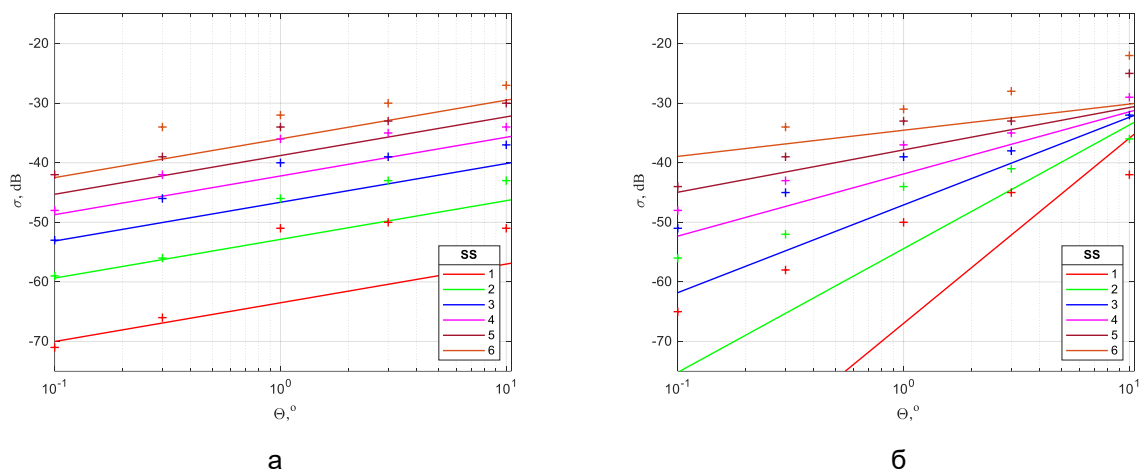


Рисунок 3. Сравнение данных Натансона (9,3 ГГц) и модели Ситтропа в X-диапазоне
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

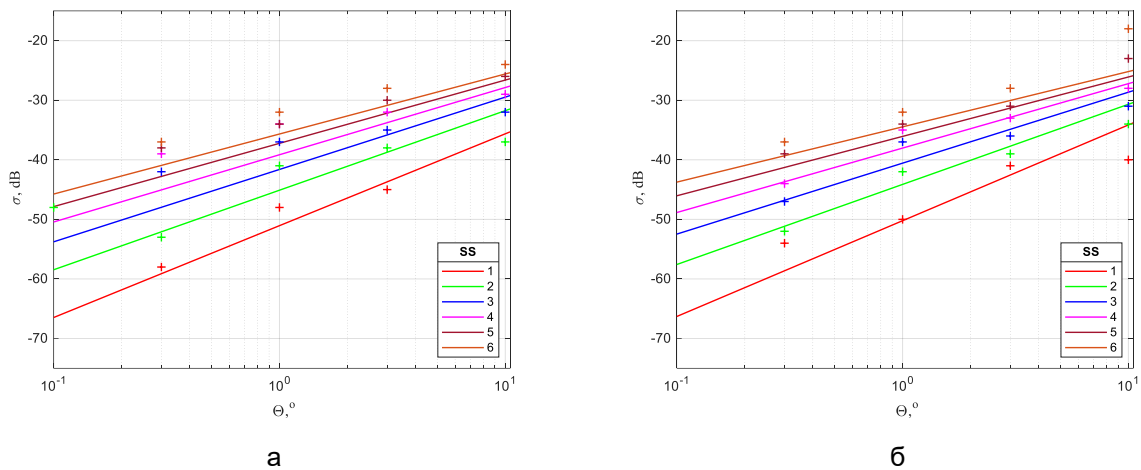


Рисунок 4. Сравнение данных Натансона (17 ГГц) и модели Ситтропа в Ку-диапазоне
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

GIT (Georgia Institute of Technology) model предложена в Технологическом институте Джорджии в 1978 году [13] (иногда в литературе встречается другое сокращение для модели – GTI [11]). Она охватывает диапазон от 1 до 100 ГГц и угол скольжения от 0,1 до 10 градусов. Для горизонтальной поляризации средняя удельная ЭПР будет выражаться:

$$\sigma_{GIT,HH}^0 = \begin{cases} 10 \log_{10}(3,9 \cdot 10^{-6} \lambda \Theta^{0,4} a_{GIT} b_{GIT} c_{GIT}), & 1 \leq f_{RF} < 10 \\ 10 \log_{10}(5,78 \cdot 10^{-6} \lambda \Theta^{0,547} a_{GIT} b_{GIT} c_{GIT}), & 10 \leq f_{RF} < 100 \end{cases}$$

или, что то же самое:

$$\sigma_{GIT,HH}^0 = \begin{cases} 10 \log_{10}(\lambda \Theta^{0,4} a_{GIT} b_{GIT} c_{GIT}) - 54,089, & 1 \leq f_{RF} < 10 \\ 10 \log_{10}(\lambda \Theta^{0,4} a_{GIT} b_{GIT} c_{GIT}) - 54,381, & 10 \leq f_{RF} < 100 \end{cases} \quad (3)$$

При вертикальной поляризации УЭПР будет выражаться следующим образом:

$$\sigma_{GIT,VV}^0 = \begin{cases} \sigma_{GIT,HH}^0 - 1,73 \ln(\bar{h} + 0,015) + 3,76 \ln(\lambda) + \\ + 2,46 \ln(\Theta + 0,0001) + 22,2, & 1 \leq f_{RF} < 3 \\ \sigma_{GIT,HH}^0 - 1,05 \ln(\bar{h} + 0,015) + 1,09 \ln(\lambda) + \\ + 1,27 \ln(\Theta + 0,0001) + 9,7, & 3 \leq f_{RF} < 10 \\ \sigma_{GIT,HH}^0 - 1,38 \ln(\bar{h} + 0,015) + 3,43 \ln(\lambda) + \\ + 1,31 \ln(\Theta) + 18,55, & 10 \leq f_{RF} < 100 \end{cases},$$

где $\sigma_{GIT,HH}^0, \sigma_{GIT,VV}^0$ – средняя удельная ЭПР на горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно, дБ; λ – длина волны РЛС, м, f_{RF} – несущая частота,

ГГц; Θ – угол скольжения, радианы; a_{GIT} – коэффициент многолучевого распространения радиоволн; b_{GIT} – коэффициент направления морских волн; c_{GIT} – коэффициент скорости ветра, $\bar{h} = 4,52 \times 10^{-3} U^{2,5}$ – средняя высота морских волн, U – скорость ветра (м/с) в соответствии с (2).

Коэффициенты модели вычисляются по следующим формулам.

$$a_{GIT} = a^4 / (1 + a^4),$$

где

$$a = (14,4\lambda + 5,5)\Theta\bar{h} / \lambda \quad (4)$$

$$b_{GIT} = \begin{cases} \exp\left[0,2 \cos \psi_0 \cdot (1 - 2,8\Theta)(\lambda + 0,015)^{-0,4}\right], & 1 \leq f_{RF} < 10 \\ \exp\left[0,25 \cos \psi_0 \cdot (1 - 2,8\Theta)(\lambda + 0,015)^{-0,33}\right], & 10 \leq f_{RF} < 100 \end{cases},$$

где ψ_0 – угол между направлением против ветра и линией визирования.

В ряде источников, например, в [2, 10], формула (4) представлена в виде:

$$a = (14,4\lambda + 5,5)\Theta\bar{h} / (\lambda + 0,015),$$

однако, последнее выражение дает худшее соответствие экспериментальным результатам, в дальнейшем при расчетах будем использовать выражение (4).

$$c_{GIT} = \begin{cases} \left(\frac{1,94U}{1 + U/15,4}\right)^{1,1(\lambda + 0,015)^{-0,4}}, & 1 \leq f_{RF} < 10 \\ \left(\frac{1,94U}{1 + U/15,4}\right)^{1,93\lambda^{-0,04}}, & 10 \leq f_{RF} < 100 \end{cases} \quad (5)$$

Данная модель хорошо описывает удельную ЭПР при волнении моря в 4 и более баллов, однако, при волнении моря 3 балла и ниже наблюдаются значительные расхождения с экспериментальными данными [2, 11].

На рисунках 5–7 показано сравнение данных Натансона и модели GIT при зондировании против ветра для частот 3, 9, 3 и 17 ГГц, соответственно.

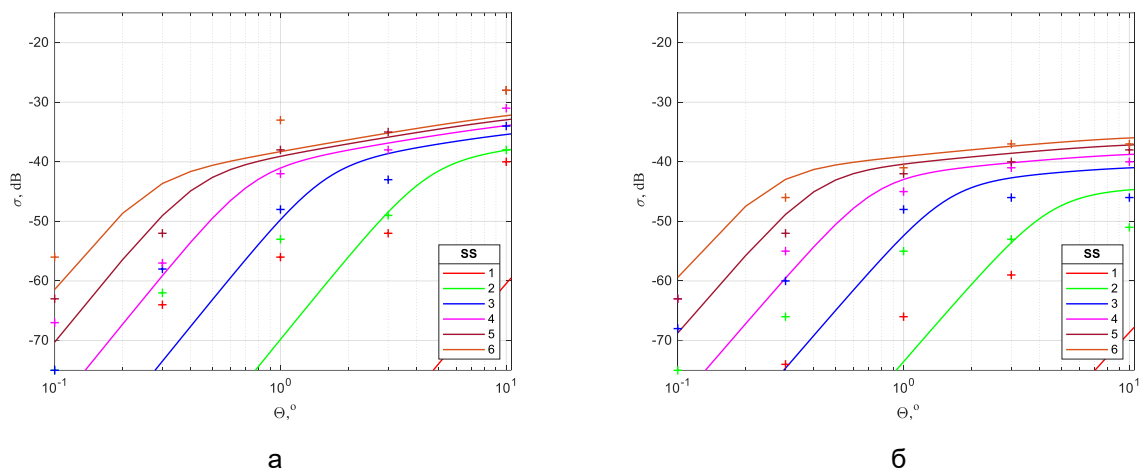


Рисунок 5. Сравнение данных Натансона и модели GIT, частота 3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

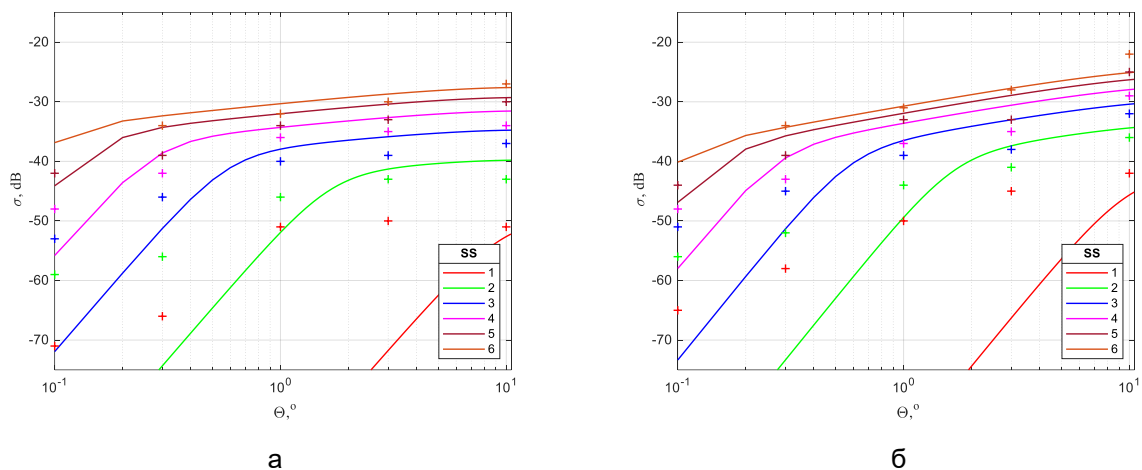


Рисунок 6. Сравнение данных Натансона и модели GIT, частота 9,3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

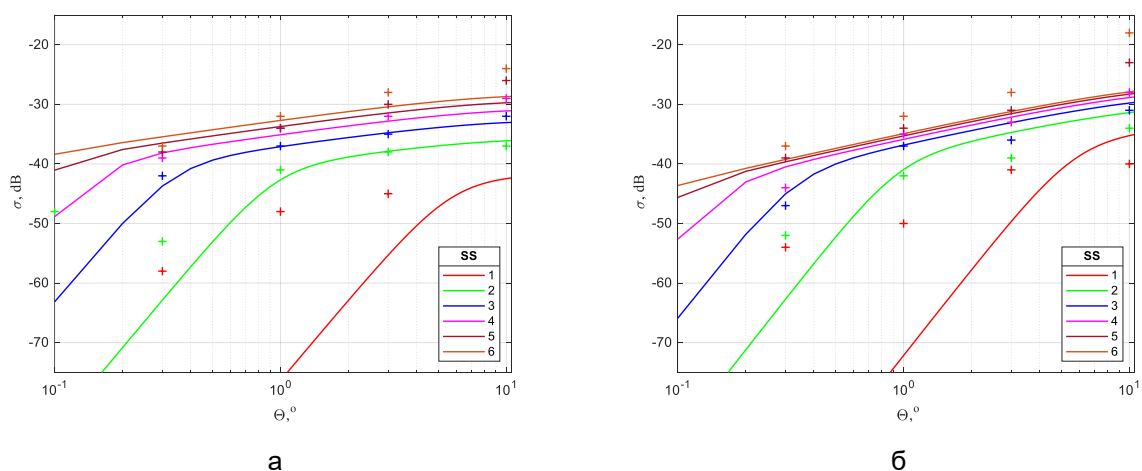


Рисунок 7. Сравнение данных Натансона и модели GIT, частота 17 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

Гибридная модель, *Hybrid model (HYB model)* была предложена в 1990 и сочетает в себе элементы модели GTI и данные таблиц Натансона [14]. Она основана на корректировках эталонного обратного рассеяния σ_{ref} , соответствующего волнению моря 5 баллов, углу скольжения $0,1^\circ$, направлению зондирования против ветра и вертикальной поляризации. Также в неявной форме учитывается влияние атмосферного волновода.

$$\sigma_{Hyb}^0 = \sigma_{ref} + K_g + K_s + K_p + K_d,$$

где K_g, K_s, K_p, K_d – параметры, зависящие, соответственно, от угла скольжения, состояния моря, поляризации и угла между направлением ветра и углом наблюдения. Перечисленные переменные определяются выражениями:

$$\sigma_{ref} = \begin{cases} 24,4 \log_{10}(f_{RF}) - 65,2, & 0,5 \leq f_{RF} < 12,5 \\ 3,25 \log_{10}(f_{RF}) - 42, & 12,5 \leq f_{RF} < 35 \end{cases}$$

где f_{RF} – частота радиолокатора, ГГц.

$$\Theta_t \geq \Theta_{ref}, K_g = \begin{cases} 0, & \Theta \leq \Theta_{ref} \\ 20 \log_{10}(\Theta / \Theta_{ref}), & \Theta_{ref} < \Theta \leq \Theta_t \\ 20 \log_{10}(\Theta_t / \Theta_{ref}) + 10 \log_{10}(\Theta / \Theta_t), & \Theta_t < \Theta \leq 30^\circ, \end{cases}$$

где Θ – угол скольжения, $\Theta_{ref} = 0,1^\circ$ – эталонный угол, Θ_t – переходный угол, равный: $\Theta_t = \arcsin(0,66\lambda / \sigma_h)$ [14], также в литературе встречается следующие выражения для переходного угла [2]: $\Theta_t = \arcsin(0,066\lambda / \sigma_h)$ и [15]:

$$\Theta_t = \arcsin(0,0632\lambda / \sigma_h) \quad (6)$$

где λ , м – длина волны радиолокатора, σ_h – среднеквадратичная высота волн, вычисляемая как $\sigma_h = 0,031 \cdot SS$ [2, 14, 15]. Для дальнейших вычислений будем использовать формулу (6), как обеспечивающую лучшее соответствие экспериментальным данным.

$$\Theta_t < \Theta_{ref}, K_g = \begin{cases} 0 & \Theta \leq \Theta_{ref} \\ 10 \log_{10}(\Theta / \Theta_{ref}) & \Theta > \Theta_{ref} \end{cases}$$

$$K_s = 5(b_m - 5)$$

$$K_p = \begin{cases} 0, & VV \\ 1,7 \ln(\bar{h} + 0,015) - 3,8 \ln(\lambda) - 2,5 \ln(\Theta + 0.0001) - 22,2, & 0,5 \leq f_{RF} < 3 \\ 1,1 \ln(\bar{h} + 0,015) - 1,1 \ln(\lambda) - 1,3 \ln(\Theta + 0.0001) - 9,7, & 3 \leq f_{RF} < 10 \quad HH \\ 1,4 \ln(\bar{h}) - 3,4 \ln(\lambda) - 1,3 \ln(\Theta) - 18,6, & 10 \leq f_{RF} < 35 \end{cases}$$

$$\bar{h} = 0,08 \cdot SS^2$$

$$K_d = (2 + 1,7 \log_{10}(0,1/\lambda))(\cos \psi - 1)$$

На рисунках 8 и 9 показано сравнение данных Натансона и гибридной модели при зондировании по ветру на частотах 3 и 17 ГГц, соответственно.

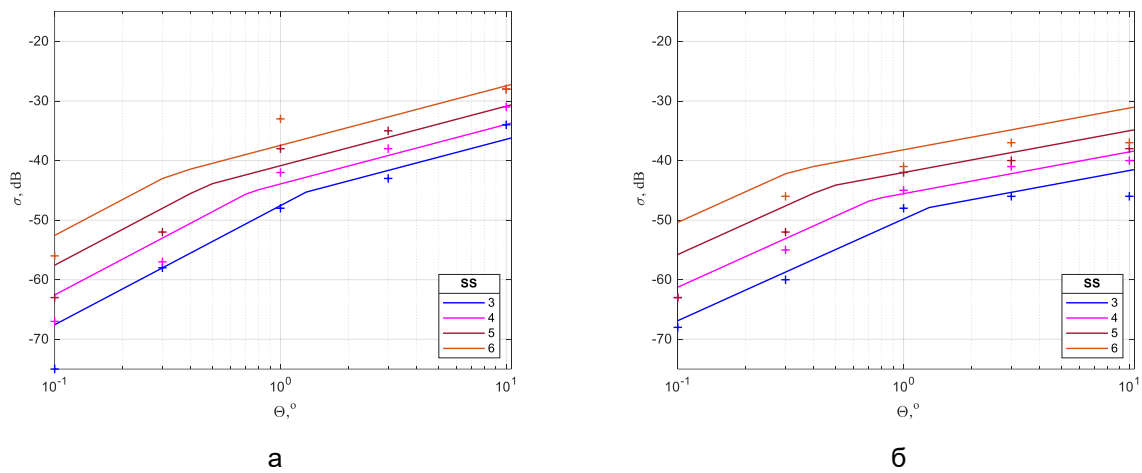


Рисунок 8. Сравнение данных Натансона и гибридной модели, частота 3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

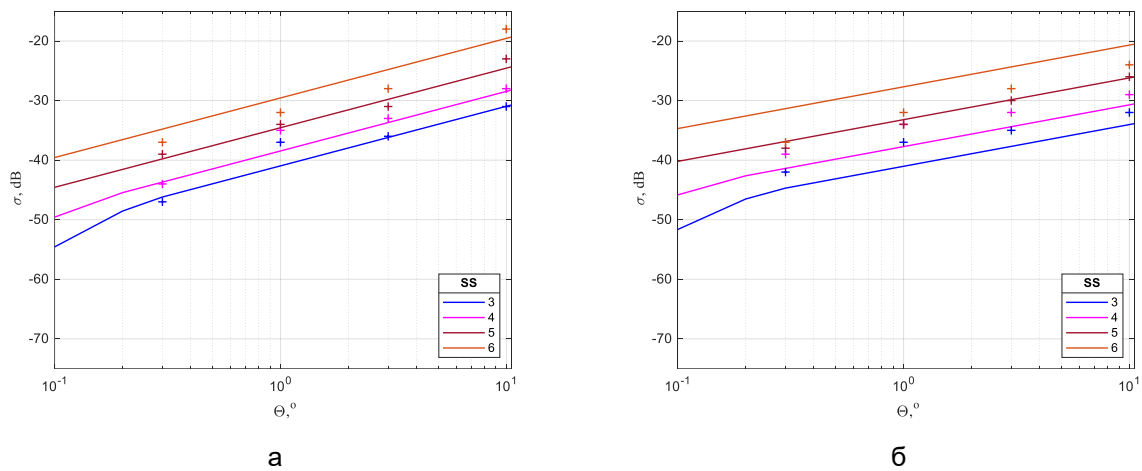


Рисунок 9. Сравнение данных Натансона и гибридной модели, частота 17 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

TSC (Technology Service Corporation) model [16] структурно напоминает модели GIT и Gybryd, сочетает в себе составляющие для малых углов скольжения на основе модели, соответствующей таблицам Натансона и для больших углов скольжения на основе анализа экспериментальных данных и теоретических исследований. В частности, модель предполагает, что в зависимости от угла скольжения доминируют два различных механизма: квазизеркальное отражение при больших углах скольжения и диффузное рассеяние при малых углах скольжения, при этом полное обратное рассеяние представляет собой сумму этих двух составляющих. В дальнейшем [17] модель была доработана для лучшего учета направления ветра относительно наблюдателя. Первоначально модель имела вид [2, 15]:

$$\sigma_{TSC,HH}^0 = 10 \log \left(1,7 \cdot 10^{-5} \Theta_r^{0,5} G_u G_w G_a / (3,2808\lambda + 0,05)^{1,8} \right),$$

$$\sigma_{TSC,VV}^0 = \begin{cases} \sigma_{TSC,HH}^0 - 1,73 \ln(8,225\sigma_h + 0,05) + 3,76 \ln \lambda + & f_{RF} < 2 \\ +2,46 \ln(\sin \Theta_r + 0,0001) + 24,2672 & \\ \sigma_{TSC,HH}^0 - 1,05 \ln(8,225\sigma_h + 0,05) + 1,09 \ln \lambda + & f_{RF} \geq 2 \\ +1,27 \ln(\sin \Theta_r + 0,0001) + 10,945 & \end{cases} \quad (7)$$

где

$$G_u = \begin{cases} 1 & \Theta = 90^\circ \\ \exp \left(0,3 \cos \psi_0 \exp(-\Theta / 0,17) / \left(10,7636\lambda^2 + 0,005^{0,2} \right) \right) & \Theta < 90^\circ \end{cases},$$

$$G_w = ((1,9438U + 4) / 15)^A,$$

$$U = 3,189SS^{0,8} \quad (8)$$

$$A = 2,63A_1 / (A_2A_3A_4),$$

$$A_1 = \left(1 + (\lambda / 0,00914)^3 \right)^{0,1}, \quad A_2 = \left(1 + (\lambda / 0,03048)^3 \right)^{0,1},$$

$$A_3 = \left(1 + (\lambda / 0,09144)^3 \right)^{\Theta^{0,6/3}}, \quad A_4 = 1 + 0,35\Theta^{0,6},$$

$$G_a = \sigma_a^{1,5} / (1 + \sigma_a^{1,5}),$$

$$\sigma_a = 4,5416\Theta(3,2808\sigma_z + 0,25) / \lambda, \quad \sigma_z = 0,03505SS^{1,95},$$

где λ – длина волны РЛС, м, f_{RF} – несущая частота, ГГц; Θ – угол скольжения, радианы, σ_z – стандартное отклонение морской поверхности, ψ_0 – угол между направлением против ветра и линией визирования, радианы.

В последующем модель была дополнена ещё одной составляющей, учитывающей квазизеркальное отражение при больших углах скольжения:

$$\sigma_{TSC,HH}^0 = 10 \log \left(1,7 \cdot 10^{-5} \Theta^{0,5} G_u G_w G_a G_d / (3,2808 \lambda + 0,05)^{1,8} + \sigma_{qs}^0 \right),$$

$$G_d = 1 - 0,6 \sin^2(\Psi_0), \quad \sigma_{qs}^0 = \mu \cot^2(\beta) \exp \left(-\frac{\tan^2(0,5\pi - \Theta)}{\tan^2(\beta)} \right),$$

$$\text{где } \mu = \begin{cases} -5 & \lambda < 0,05 \\ -5 + 12,5(\log_{10} \lambda - \log_{10} 0,05) & \lambda \geq 0,05 \end{cases}, \quad \beta = \begin{cases} 10,1 + 1,65 S_D & S_D \leq 2 \\ 13,4 + 0,7(S_D - 2) & S_D > 2 \end{cases}.$$

Формула (8) использовалась в оригинальной модели, однако для единообразия в расчетах будем использовать формулу (2). Предварительные исследования показали, что эта замена в рассматриваемом диапазоне углов увеличивает точность модели на 0,5–1 дБ. Поскольку рассматривается только диапазон малых углов, квазизеркальное отражение не будет вносить значительный вклад, поэтому при расчетах откажемся от его учета и при моделировании будем использовать формулу (7).

Заметим, что существует форма этой модели для английской системы мер, например, в [15], и многие, представленные в литературе, например, [10] и сети Интернет программные модули базируются именно на этой форме представления, что зачастую приводит к путанице.

На рисунках 10 и 11 показано сравнение данных Натансона и модели TSC при зондировании против ветра на частотах 3 и 17 ГГц, соответственно.

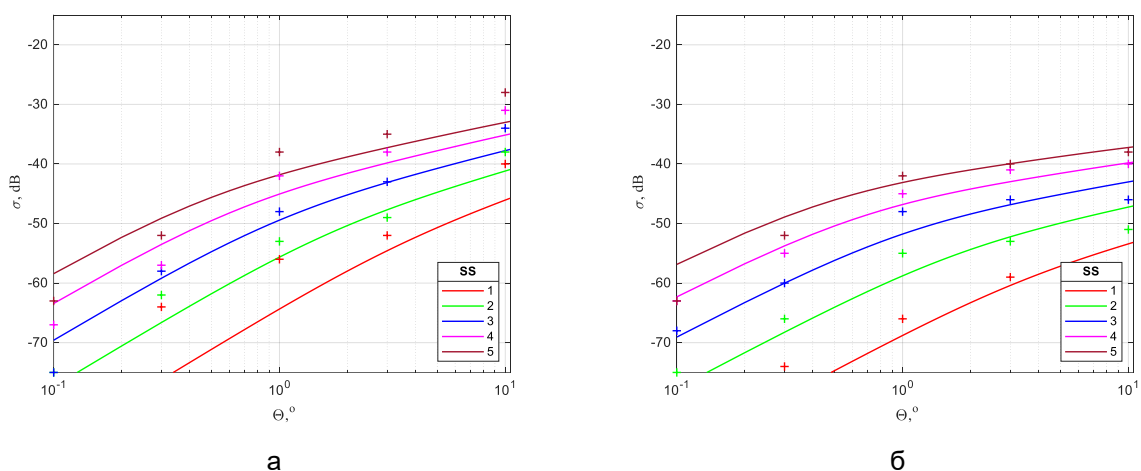


Рисунок 10. Сравнение данных Натансона и модели TSC, частота 3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

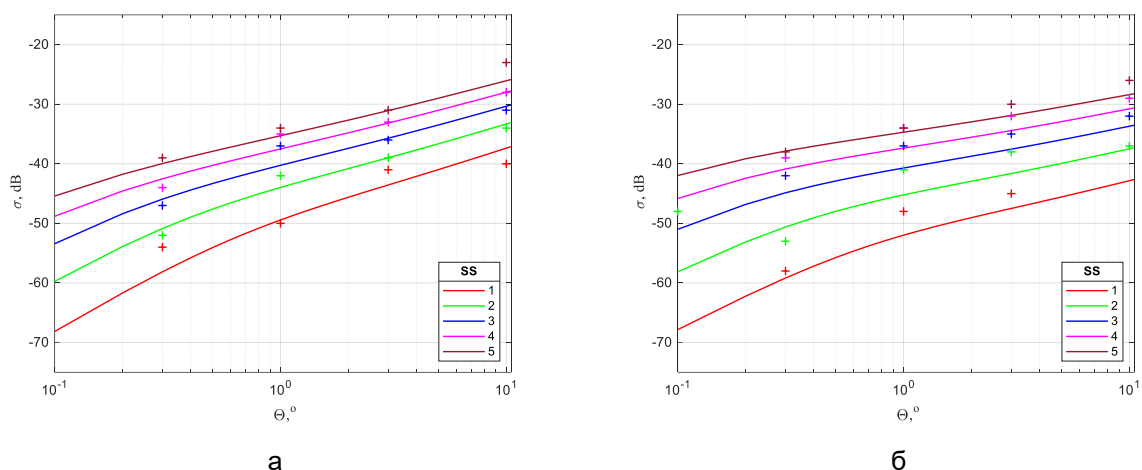


Рисунок 11. Сравнение данных Натансона и модели TSC, частота 17 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

NRL (Naval Research Laboratory) model была разработана в 2009 в военно-морской исследовательской лаборатории Вильгельмом Греггерсом–Хансеном и Рашми Митталом с целью более точного соответствия таблицам Натансона.

$$\sigma_{NRL09}^0 = c_1 + c_2 \log_{10} \sin \Theta_d + \frac{(c_3 + c_4 \Theta_d) \log_{10} f_{RF}}{1 + c_5 \Theta_d + c_6 SS} + c_7 (1 + SS)^{(2 + c_8 \Theta_d + c_9 SS)^{-1}},$$

где f_{RF} – несущая частота, ГГц; Θ_d – угол скольжения, градусы, SS – волнение моря в баллах. Значение констант $c_1 \dots c_9$ в децибелах приведены в таблице 4 [11].

Таблица 4. Константы модели NRL 2009 года

Константа	Поляризация	
	Горизонтальная	Вертикальная
c_1	-72,76	-48,56
c_2	21,11	26,30
c_3	24,78	29,05
c_4	4,917	-0,5183
c_5	0,6216	1,057
c_6	-0,02949	0,04839
c_7	26,19	21,37
c_8	0,09345	0,07466
c_9	0,05031	0,04623

Сравнение данных Натансона и модели NRL-2009 на частотах 3 и 17 ГГц показано на рисунках 12 и 13.

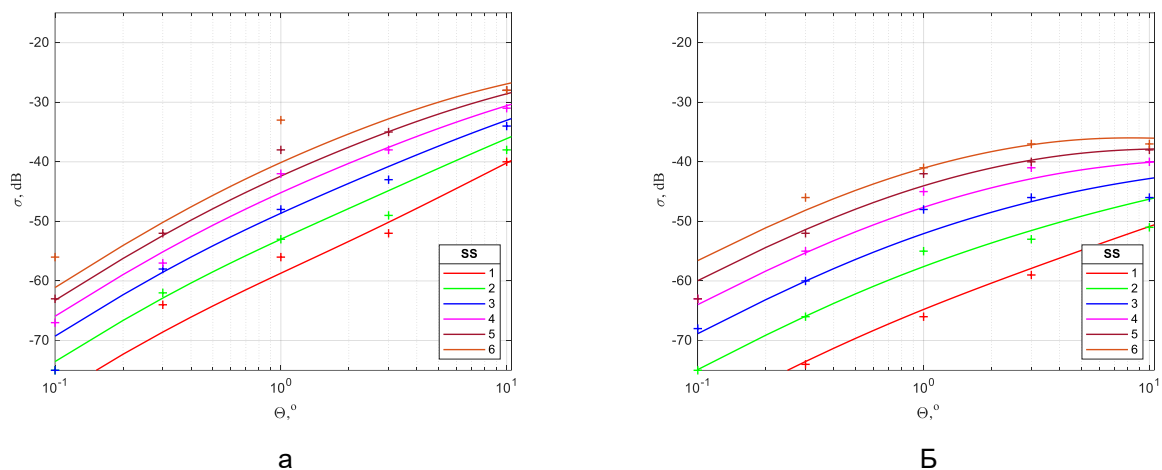


Рисунок 12. Сравнение данных Натансона и модели NRL 2009 года, частота 3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

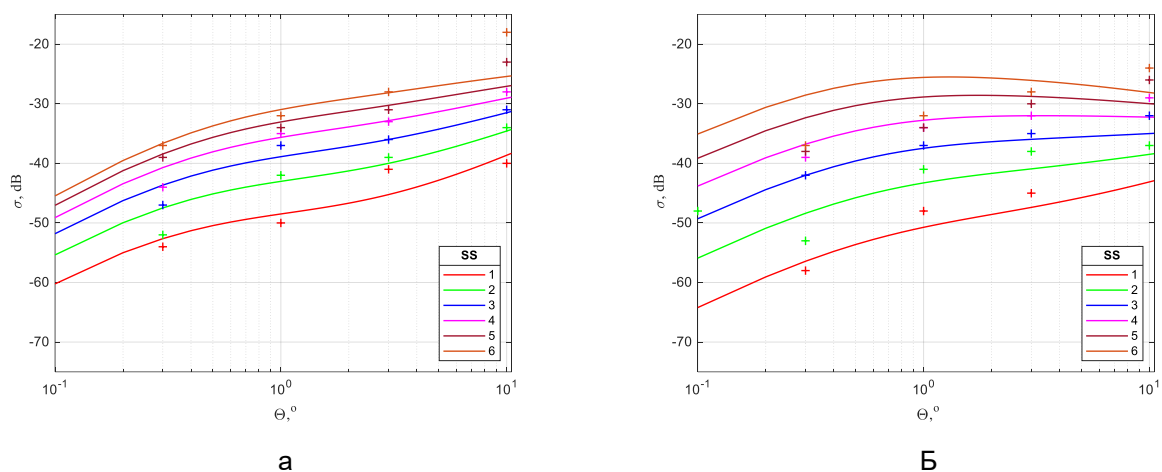


Рисунок 13. Сравнение данных Натансона и модели NRL 2009 года, частота 17 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

В 2012 году этими же авторами была предложена новая версия модели, отличающаяся меньшим числом констант, зависящих от поляризации:

$$\sigma_{NRL12}^0 = c_1 + c_2 \log_{10} \sin \Theta + \frac{(27.5 + c_3 \Theta) \log_{10} f_{RF}}{1 + 0.95 \Theta} + c_4 (1 + SS)^{(2 + 0.085 \Theta + 0.033 SS)^{-1}} + c_5 \Theta^2.$$

Значения соответствующих констант приведены в таблице 5 [10].

Таблица 5. Константы модели NRL 2012 года

Константа	Поляризация	
	Горизонтальная	Вертикальная
c_1	-73	-50,79
c_2	20,78	25,93
c_3	7.351	0,7093
c_4	25.65	21,58
c_5	0,00540	0,00211

Сравнение данных Натансона и модели NRL-2012 на частотах 3 и 17 ГГц показано на рисунках 14 и 15.

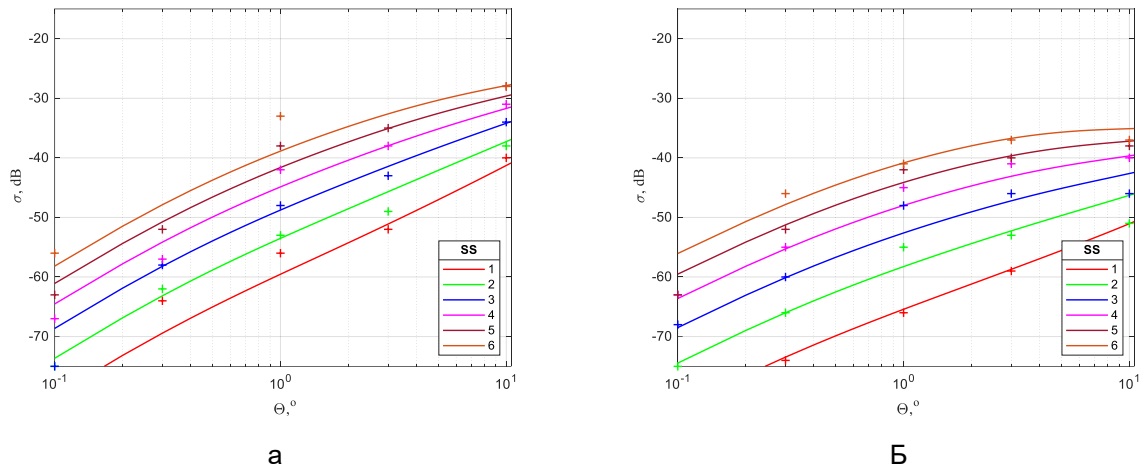


Рисунок 14. Сравнение данных Натансона и модели NRL 2012 года, частота 3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

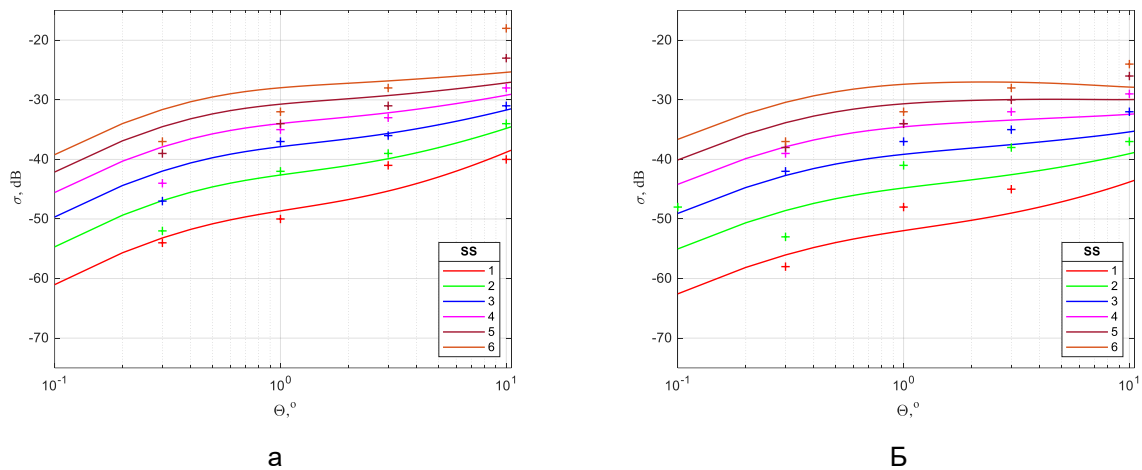


Рисунок 15. Сравнение данных Натансона и модели NRL 2012 года, частота 17 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

DSTG (Defence science and technology organisation) continuous model для X-диапазона была предложена в 2007 году Люком Розенбергом и Саймоном Ваттом, как расширение модели GIT на больший диапазон углов скольжения [2, 18]. В рамках модели, для малых углов скольжения (0,1–3 градуса) используется модель GIT. Удельная ЭПР морской поверхности для углов 20°–45° рассчитывается на основе модели σ_{med}^0 , предложенной в [18] по результатам обработки данных РЛС авиационного базирования Ingara [19, 20]:

$$\sigma_{med}^0(\Theta, \Psi) = \left(\frac{\Theta}{\Theta_0} \right)^\gamma [\alpha_0 + \alpha_1 \cos(\Psi) + \alpha_2 \cos(2\Psi)],$$

где $\Theta_0 = 30^\circ$ – параметр нормализации, $\gamma, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ – коэффициенты модели, зависящие от скорости ветра U и значимой высоты волны $h_{1/3}$ и определяющиеся соотношением:

$Y = b_0 + b_1 \log_{10}(U) + b_2 h_{1/3}$, где $Y \equiv [\gamma, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2]$. Значения коэффициентов модели приведены в таблице 6.

Связующая функция σ_{lin}^0 обеспечивает непрерывность значений УЭПР при промежуточных значениях углов и их рост при увеличении угла скольжения [18]. Полностью модель описывается следующими соотношениями:

$$\sigma_{DSTG}^0(\Theta, \Psi) = \begin{cases} \sigma_{GIT}^0(\Theta, \Psi) & 0,1^\circ \leq \Theta < 3^\circ \\ \sigma_{lin}^0(\Theta, \Psi) & 3^\circ \leq \Theta < 20^\circ, \\ \max\{\sigma_{med}^0(\Theta, \Psi), \sigma_{lin}^0(20^\circ, \Psi)\} & 20^\circ \leq \Theta \leq 45^\circ \end{cases}$$

где $\sigma_{lin}^0(\Theta, \Psi) = \sigma_{GIT}^0(3, \Psi) + K(\Psi)(\Theta - 3)$, $K(\Psi) = |\sigma_{med}^0(20, \Psi) - \sigma_{GIT}^0(3, \Psi)| \cdot 17^{-1}$.

Таблица 6. Коэффициенты модели DSTG

Поляризация	Коэффициенты	b_0	b_1	b_2
Горизонтальная	γ	-1,21	0,64	0,0082
	α_0	-78,74	49,42	-0,2
	α_1	11,72	-9,14	-0,012
	α_2	-0,035	2,21	-0,15
Вертикальная	γ	0,16	-0,57	0,05
	α_0	-47,78	27,15	-0,56
	α_1	-0,032	0,69	0,023
	α_2	0,51	2,31	-0,21

Сравнение данных Натансона и модели DSTG на частоте 9,3 ГГц при зондировании против ветра показано на рисунке 16.

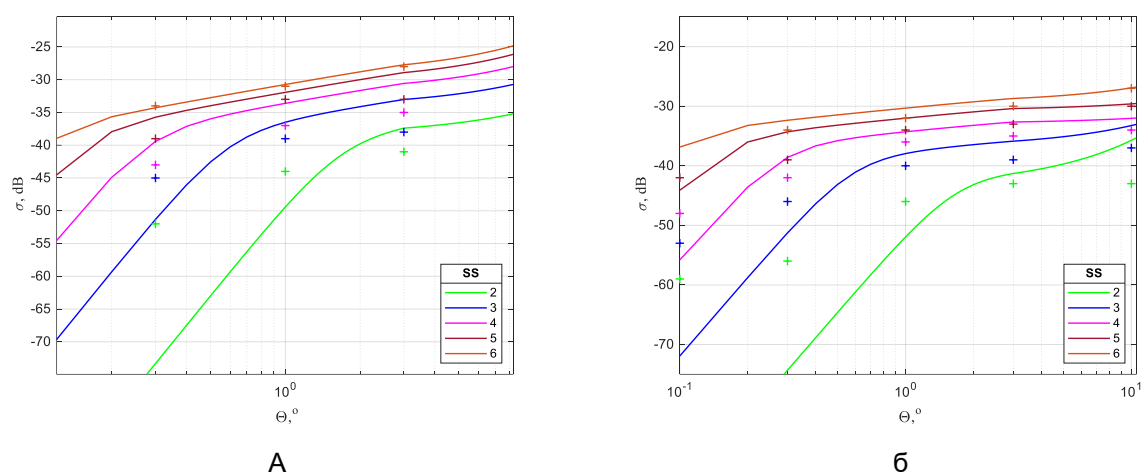


Рисунок 16. Сравнение данных Натансона и модели DSTG, частота 9,3 ГГц
а – вертикальная поляризация, б – горизонтальная поляризация

Результаты

Теперь рассмотрим точность моделей относительно экспериментальных данных, приведенных в [1]. Для этого сначала оценим диапазон моделирования. Границы применимости моделей, заявленные их авторами, приведены в таблице 7. Сразу стоит отметить, что все модели охватывают диапазон углов скольжения до 10 градусов, что как раз соответствует малым углам скольжения.

Таблица 7. Список моделей и заявленные границы их применимости

Модель	Частота, ГГц	Угол скольжения, °	Волнение моря, баллы	Угол относительно направления ветра, °
RRE	9–10	0,1–10	1–6	–
Sittrop	8–18	0,1–10	1–6	против/поперек
GIT	1–100	0,1–10	0–6	0–360
Hybrid	0,5–35	0,1–30	3–6	0–360
TSC	0,5–35	0–90	0–5	0–360
NRL	0,5–35	0,1–60	0–8	–
DSTG	8–12	0,1–45	2–6	0–360

В интересующем нас диапазоне углов в таблицах Натансона представлены значения удельной ЭПР для вертикальной и горизонтальной поляризации на частотах 0,5, 1,25, 3, 5,6, 9,3, 17 и 35 ГГц при углах 0,1, 0,3, 1, 3 и 10 градусов для волнения от 0 до 6 баллов по шкале Дугласа. Для оценки точности моделей будем сравнивать среднее значение отклонения от данных таблиц Натансона в границах применимости каждой модели для вертикальной и горизонтальной поляризаций. Модель GIT при волнении моря в 0 баллов, в соответствии с выражениями (2,3,5) будет принимать бесконечное значение, поэтому для нее $SS = 0$ будет исключено из расчетов. Для моделей, имеющих зависимость от угла визирования относительно направления ветра, будем считать значение для углов визирования, равных 0, 90 и 180 градусов (0 градусов соответствует направлению против ветра), а также их среднее (таблица 8). Исключением будет модель Ситтропа, в ней будем усреднять только по двум углам, представленным в модели.

Таблица 8. Результат оценки точности моделей

Модель	RRE	Sittrop X/Ku	GIT	Hybrid	TSC	NRL 09/12	DSTG
Горизонтальная поляризация							
0°	–	2,44/2,51	11,03	6,96	3,86	–	5,68
90°	–	3,94/3,24	11,86	4,99	4,93	–	6,06
180°	–	–	13,46	4,16	3,42	–	7,94
Среднее	2,47	3,19/2,88	12,12	5,37	4,07	2,16/2,29	6,56
Вертикальная поляризация							
0°	–	3,91/3,32	11,6	7,13	3,80	–	6,13
90°	–	7,61/2,21	12,7	5,56	4,48	–	6,77
180°	–	–	14,4	5,17	3,25	–	8,20
Среднее	1,85	5,76/2,77	12,90	5,95	3,84	2,02/2,24	7,03

Заключение

Полученные в результате исследования значения хорошо согласуются с результатами подобных исследований, представленных, например, в источниках [3, 6, 10, 11]. Отличия обусловлены ранее рассмотренными вариациями в представлении моделей. Также в литературных источниках методика оценки, как правило, не имеет четкого описания, что не позволяет однозначно повторить полученные их авторами результаты. В данной статье была предпринята попытка представить максимально прозрачную методику оценки соответствия результатов использования моделей эмпирическим данным. Кроме того, для рассмотренных моделей для малых углов падения были исследованы различные вариации используемых коэффициентов и входных данных.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме Министерства науки и высшего образования № FSEE-2025-0006.

Список литературы

1. Nathanson F. E., Reilly J. P., Cohen M. Radar design principles. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 720 p.
2. Rosenberg L., Watts S. Radar sea clutter: modelling and target detection. London: The Institute of Engineering Technology, 2022. 349 p.
3. Yang B., Jiang M., Wang J. Performance analysis of empirical models of sea surface reflectivity based on measured data // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2290. 012098. DOI: 10.1088/1742-6596/2290/1/012098
4. Zhao J., Gao H., Jiang R., Wang X. An improved SASS model for sea clutter reflectivity // International conference on computational modeling, simulation and optimization (CMSO 2019). Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, 2019. 28–35. DOI: 10.12783/dtcse/cmso2019/33589
5. Watts S., Rosenberg L. Challenges in radar sea clutter modelling // IET Radar, Sonar & Navigation. 2022. 16 (9). 1403–1414. DOI: 10.1049/rsn2.12272
6. Wu G., Fan J., Zhang F., Lu F. Semi-empirical model of sea clutter based on Zero Memory Nonlinearity // IEEE Access. 2019. 7. 18125–18137. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2897781
7. Rosenberg L., Watts S. High Grazing angle sea-clutter literature review. Edinburgh, South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2013. 44 p.
8. Ward K., Tough R., Watts S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance. London: The Institute of Engineering Technology, 2006. 452 p.
9. Веремьев В. И., Воробьев Е. Н., Коновалов А. А., Кутузов В. М., Маругин А. С., Михайлов В. Н., Орлов В. К. Радиоэлектронные системы и комплексы: учебное пособие: в 2 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. 156 с.
10. Vilhelm G.-H., Mittal R. An improved empirical model for radar sea clutter reflectivity. Washington: Naval Research Laboratory, 2012. 45 p.

11. Vilhelm G.-H., Mittal R. An empirical sea clutter model for low grazing angles // IEEE Radar Conference Proceedings. Pasadena, 2009. 1–5. DOI: 10.1109/RADAR.2009.4977006
12. Sittrop H. On the sea-clutter dependency on windspeed // IEE Radar Conference Proceedings. London: I.E.E., 1977. 110–114.
13. Horst M. M., Dyer F. B., Tuley M. T. Radar sea clutter model // IEEE International Conference on Antennas and Propagation Proceedings, Part 2. London: I.E.E., 1978. 169. 5–10.
14. Reilly J. P., Dockery G. D. Influence of evaporation ducts on radar sea return // IEE Proceedings. 1990. 137F (2). 80–88.
15. Antipov I. Simulation of sea clutter returns. Salisbury: DSTO Electronic and Surveillance Research Laboratory, 1998. 58 p.
16. Technology service corporation. Backscatter from sea. Radar workstation, 1990. 2. 177–186.
17. Spaulding B., Horton D., Pham H. Wind aspect factor in sea clutter modeling // IEEE Radar Conference. Arlington: I.E.E., 2005. 1–4. DOI: 10.1109/RADAR.2005.1435799
18. Rosenberg L., Watts S. Continuous sea clutter models for the mean backscatter and K-distribution shape // International Conference on Radar Systems. 2017. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2017.0602
19. Rosenberg L., Watts S. High grazing angle sea-clutter literature review. Edinburgh, South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2013. 85 p.
20. Rosenberg L., Watts S., Bocquet S., Ritchie M. Characterisation of the Ingara HGA dataset // IEEE national radar conference proceedings. Arlington: I.E.E., 2015. 27–32. DOI: 10.1109/RADAR.2015.7130965

References

1. Nathanson F. E., Reilly J. P., Cohen M. Radar design principles. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 720 p.
2. Rosenberg L., Watts S. Radar sea clutter: modelling and target detection. London: The Institute of Engineering Technology, 2022. 349 p.
3. Yang B., Jiang M., Wang J. Performance analysis of empirical models of sea surface reflectivity based on measured data // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2290. 012098. DOI: 10.1088/1742-6596/2290/1/012098
4. Zhao J., Gao H., Jiang R., Wang X. An improved SASS model for sea clutter reflectivity // International conference on computational modeling, simulation and optimization (CMSO 2019). Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, 2019. 28–35. DOI: 10.12783/dtcse/cmso2019/33589
5. Watts S., Rosenberg L. Challenges in radar sea clutter modelling // IET Radar, Sonar & Navigation. 2022. 16 (9). 1403–1414. DOI: 10.1049/rsn2.12272
6. Wu G., Fan J., Zhang F., Lu F. Semi-empirical model of sea clutter based on Zero Memory Nonlinearity // IEEE Access. 2019. 7. 18125–18137. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2897781
7. Rosenberg L., Watts S. High Grazing angle sea-clutter literature review. Edinburgh, South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2013. 44 p.
8. Ward K., Tough R., Watts S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance. London: The Institute of Engineering Technology, 2006. 452 p.
9. Veremyov V. I., Vorobev E.N., Konovalov A. A., Kutuzov V. M., Marugin A. S., Mikhaylov V. N., Orlov V. K. Radioelectronic systems and complexes: textbook allowance. in 2 parts, part 1. SPb: ETU “LETI” Publ., 2022. 156 p. (In Russian).

10. Vilhelm G.-H., Mittal R. An improved empirical model for radar sea clutter reflectivity. Washington: Naval Research Laboratory, 2012. 45 p.
11. Vilhelm G.-H., Mittal R. An empirical sea clutter model for low grazing angles // IEEE Radar Conference Proceedings. Pasadena, 2009. 1–5. DOI: 10.1109/RADAR.2009.4977006
12. Sittrop H. On the sea-clutter dependency on windspeed // IEE Radar Conference Proceedings. London: I.E.E., 1977. 110–114.
13. Horst M. M., Dyer F. B., Tuley M. T. Radar sea clutter model // IEEE International Conference on Antennas and Propagation Proceedings, Part 2. London: I.E.E., 1978. 169. 5–10.
14. Reilly J. P., Dockery G. D. Influence of evaporation ducts on radar sea return // IEE Proceedings. 1990. 137F (2). 80–88.
15. Antipov I. Simulation of sea clutter returns. Salisbury: DSTO Electronic and Surveillance Research Laboratory, 1998. 58 p.
16. Technology service corporation. Backscatter from sea. Radar workstation, 1990. 2. 177–186.
17. Spaulding B., Horton D., Pham H. Wind aspect factor in sea clutter modeling // IEEE Radar Conference. Arlington: I.E.E., 2005. 1–4. DOI: 10.1109/RADAR.2005.1435799
18. Rosenberg L., Watts S. Continuous sea clutter models for the mean backscatter and K-distribution shape // International Conference on Radar Systems. 2017. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2017.0602
19. Rosenberg L., Watts S. High grazing angle sea-clutter literature review. Edinburgh, South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2013. 85 p.
20. Rosenberg L., Watts S., Bocquet S., Ritchie M. Characterisation of the Ingara HGA dataset // IEEE national radar conference proceedings. Arlington: I.E.E., 2015. 27–32. DOI: 10.1109/RADAR.2015.7130965

Информация об авторе

Михайлов Вячеслав Николаевич – старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-8155-9310, vnmikhaylov@etu.ru

РАДИОТЕХНИКА

УДК 669.713:536.63

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).442-454

Поступила в редакцию / Received 27.06.2025

ГРНТИ 53.37.29+29.19.09

Специальность ВАК 2.2.13.; 2.6.17.

Принята к публикации / Accepted 28.10.2025

Научная статья

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЖЕЛЕЗА НА ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ АЛЮМИНИЯ МАРКИ А6

Сафаров А. Г.¹, Бексеитова Г. К.¹, Ганиев И. Н.²

¹ Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана
(Душанбе, Республика Таджикистан)

² Институт химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана
(Душанбе, Республика Таджикистан)

Аннотация. В условиях строго контролируемого термостатирования был выполнен детальный анализ влияния температуры на удельную теплоемкость, а также проведена оценка преобразований ключевых термодинамических характеристик алюминиевого сплава А6, легированного железом. Работы проводились в широком температурном интервале от 300 до 800 К. Показано, что прогревание образца в указанных пределах вызывает закономерное увеличение таких показателей, как теплоемкость, энтальпия и энтропия исследуемого материала. Одновременно было зафиксировано закономерное уменьшение значения энергии Гиббса, что является однозначным свидетельством сокращения объема свободной энергии в системе. Выявлено, что рост концентрации железной добавки в химическом составе алюминиевого сплава инициирует развитие противоположного эффекта. В данном случае была отмечена обратная зависимость: с повышением массовой доли железа удельная теплоемкость, энтальпия и энтропия образцов начинают снижаться.

Ключевые слова: алюминий марки А6, железо, теплоемкость, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

Для цитирования: Сафаров А. Г., Бексеитова Г. К., Ганиев И. Н. Влияние добавок железа на теплоемкость и термодинамические функции алюминия марки А6 // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 442–454. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).442-454

Research Article

INFLUENCE OF IRON ADDITIVES ON THE HEAT CAPACITY AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF A6 ALUMINUM

Safarov A. G.¹, Bekseitova G. K.¹, Ganiev I. N.²

¹ S. U. Umarov Physical–Technical Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan
(Dushanbe, Republic of Tajikistan)

² V. I. Nikitin Chemistry Institute of the Tajikistan Academy of Sciences (Dushanbe, Republic of Tajikistan)

Abstract. Under strictly controlled thermostating conditions, a detailed analysis was carried out to examine the influence of temperature on the specific heat capacity, as well as to assess the transformations of key thermodynamic functions of the A6 aluminum alloy alloyed with iron. The experiments were performed over a wide temperature range from 300 to 800 K. It was shown that heating the sample within these limits results in a regular increase in such characteristics as heat capacity, enthalpy, and entropy of the investigated material. At the same time, a systematic decrease in Gibbs free energy was observed, which is clear evidence of a reduction in the amount of free energy in the system. It was further established that an increase in the concentration of iron in the chemical composition of the aluminum alloy initiates the development of the opposite effect. In this case, an inverse dependence was recorded: as the mass fraction of iron increases, the specific heat capacity, enthalpy, and entropy of the samples begin to decrease.

Keywords: *A6 aluminum, iron, heat capacity, “cooling” mode, enthalpy, entropy, Gibbs energy*

For citation: Bekseitova G. K., Ganiev I. N., Safarov A. G. Influence of iron additives on the heat capacity and thermodynamic properties of A6 Aluminum // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 442–454. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).442-454

Введение

Создание новых алюминиевых сплавов, совершенствование методов их получения и повышение эксплуатационных характеристик невозможно без параллельного развития фундаментальных металлургических исследований. Наряду с решением прикладных технологических задач, именно научное осмысление процессов, происходящих в структуре сплавов, служит основой для прогресса в данной области. Качество легких алюминиевых материалов напрямую влияет на уровень технического развития в ключевых секторах промышленности [1, 2].

Железо повсеместно признано одним из наиболее часто встречающихся составляющих элементов в составе разнообразных алюминиевых сплавов. Его происхождение в материале чаще всего носит технологический характер: оно мигрирует в качестве неустраняемой побочной примеси на этапе промышленного производства первичного алюминия. Этот процесс неизбежен при стандартном использовании таких методов, как байеровский процесс получения глинозема и последующий электролиз по методу Холла–Эру. Помимо этого, значительным источником поступления железа служит вторичная переработка алюминийсодержащего металлолома, где оно выступает распространенным загрязнителем.

Впрочем, в некоторых случаях внесение железа осуществляется намеренно, в роли легирующей добавки, основной функцией которой является повышение твердости и прочности конечного продукта. Несмотря на это полезное свойство, избыточная концентрация данного элемента имеет серьезный побочный эффект – он провоцирует возрастание хрупкости, что в конечном итоге отрицательно влияет на комплекс механических характеристик материала, делая его менее пластичным и устойчивым к ударным нагрузкам.

Важнейшим фактором, определяющим поведение железа в алюминии, является его исключительно низкая растворимость в твердом растворе на основе алюминия. При максимальной равновесной температуре в 625°C этот показатель не превышает крайне малого значения в 0,04% по массе. Вследствие этого физико-химического ограничения избыточное железо не растворяется, а выделяется в виде самостоятельных интерметаллических фаз сложного состава [5].

Конкретный тип формирующихся соединений напрямую зависит от химического состава сплава (в частности, наличия кремния) и кинетических параметров процесса его кристаллизации. В широко распространенных алюминиевых сплавах системы алюминий–кремний (Al–Si) железо преимущественно образует стабильные фазы, среди которых наиболее типичными являются $\alpha\text{-Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$, $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ и $\delta\text{-Al}_9\text{FeSi}_2$.

Стоит подчеркнуть, что среди всего разнообразия интерметаллидов в силу термодинамической стабильности и кинетических преимуществ именно игольчатая фаза $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ является наиболее распространенной. Она оказывает выраженное негативное влияние на механические характеристики материала. В микроструктуре она проявляется в виде игольчатых включений с характерными насечками, вдоль которых могут образовываться микротрещины. Такие дефекты снижают прочность и надежность сплава, особенно при динамических нагрузках [6].

Согласно литературным данным, алюминиевые сплавы с железом обладают разнообразными физико-химическими свойствами, описанными в ряде источников [7, 8]. Однако в доступных публикациях отсутствует информация о термодинамических характеристиках алюминия марки А6, легированного железом, что подчеркивает актуальность настоящего исследования.

Цель работы – определить влияние добавок железа на термодинамическое поведение алюминия А6. Исследование направлено на анализ температурной зависимости удельной теплоемкости, а также изменений таких термодинамических параметров, как энтальпия, энтропия и энергия Гиббса при варьировании содержания железа.

Экспериментальная часть

Экспериментальное получение алюминиевых сплавов выполняли в лабораторной печи сопротивления шахтного типа СШОЛ, поддерживая температурный диапазон 750–800°C. Исходными материалами выступали алюминий марки А6 и железа, вводимое в количестве от 0,5 до 1,5 мас.%. Расплавленный металл разливали в графитовые литейные формы для получения цилиндрических образцов размером $\varnothing 16 \times 30$ мм.

Химический состав сплавов определялся в Центральной лаборатории ГУП «TALCO», специализирующейся на производстве алюминия. Дополнительный контроль над точностью состава осуществлялся путем сравнительного взвешивания образцов до и после плавки. К дальнейшему анализу допускались только те образцы, у которых отклонение массы не превышало 2% от исходного значения.

Способность материала накапливать тепловую энергию, известная как теплоемкость, представляет собой ключевое физическое свойство твердых тел. Оно количественно характеризует, как изменяется внутренняя энергия вещества при нагреве или охлаждении. Анализ поведения теплоемкости в зависимости от температуры предоставляет ценную информацию о материале, позволяя установить такие параметры, как: точка и механизм фазовых превращений, характеристическая температура Дебая, энергия, требуемая для образования дефектов кристаллической решетки по типу вакансий, вклад свободных электронов в теплоемкость, а также иные существенные термодинамические характеристики.

Теплоемкость играет важнейшую роль в расчетах термодинамических функций и широко применяется в моделировании поведения материалов при различных температурных режимах. Для большинства твердых веществ ее значения могут быть получены исключительно экспериментальным путем, обеспечивающим необходимую точность для инженерных и технологических приложений. Определение теплоемкости при нестандартных температурах для ранее не изученных материалов представляет собой сложную, но крайне значимую задачу в области прикладной науки и материаловедения.

В научных публикациях представлено множество экспериментальных методик исследования физических характеристик твердых тел, демонстрирующих трансформацию их состояния под влиянием температурных колебаний. Наибольшее распространение получила техника, основанная на фиксации разницы в скорости охлаждения между изучаемым объектом и эталонным образцом в соответствии с принципами ньютоновской теплопередачи. Данный подход дает возможность не только выявлять точки фазовых превращений, но и устанавливать значения других важных теплофизических констант.

В данном исследовании использован авторский способ, предполагающий сопоставительный анализ теплоемкости испытуемого образца с эталоном, имеющим известные термодинамические свойства. Разработанная методика адаптирована для высокотемпературных измерений и гарантирует высокую достоверность при определении удельной теплоемкости [9, 10].

Вычисление теплоемкости основывается на системе фундаментальных уравнений. Количество тепловой энергии, рассеиваемой элементарным объемом dV металлического образца за бесконечно малый временной интервал $d\tau$, описывается следующим соотношением:

$$\delta Q = C_p^0 \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} \cdot dV \cdot d\tau, \quad (1)$$

где C_p^0 – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала; T – температура образца. Принято допущение о равномерном распределении температуры внутри тела, что справедливо ввиду малых геометрических размеров образца и высокой теплопроводности металлических материалов.

В качестве альтернативы, величину тепловых потерь (δQ) возможно определить в соответствии с законом охлаждения Ньютона-Рихмана:

$$\delta Q = \alpha (T - T_0) \cdot dS \cdot d\tau, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, T_0 – температура окружающей среды, dS – элемент поверхности.

Полученные уравнения (1) и (2) приравниваем между собой и получаем уравнение:

$$C_P^0 \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} dV = \alpha \cdot (T - T_0) \cdot dS, \quad (3)$$

Полное количество тепловой энергии, которое в целом теряет весь объем образца, описывается следующим выражением:

$$Q = \int_V C_P^0 \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} \cdot dV = \int_S \alpha \cdot (T - T_0) \cdot dS, \quad (4)$$

При допущении, что параметры C_P^0 , ρ и $\frac{dT}{d\tau}$ остаются постоянными в пределах всего объема, а характеристики α , T и T_0 однородны по всей поверхности образца, исходное уравнение сводится к упрощенной форме:

$$C_P^0 \cdot \rho \cdot V \frac{dT}{d\tau} = \alpha \cdot (T - T_0) \cdot S, \quad (5)$$

или

$$C_P^0 \cdot m \frac{dT}{d\tau} = \alpha \cdot (T - T_0) \cdot S, \quad (6)$$

где S – площадь поверхности, $\rho \cdot V = m$ – масса, V – объем образца.

Рассмотрим выражение (6) применительно к двум образцам, имеющим идентичные геометрические параметры. В этом случае можно считать, что их поверхности равны: $S_1 = S_2$, температуры совпадают: $T_1 = T_2$, а коэффициенты теплоотдачи также одинаковы: $\alpha_1 = \alpha_2$. При делении одного уравнения на другое получаем соотношение:

$$C_{P1}^0 = C_{P2}^0 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1} = C_{P2}^0 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2}{\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1} \quad (7)$$

Следовательно, располагая данными о массах образцов m_1 и m_2 , скоростях их охлаждения при определенной температуре, а также имея значение удельной теплоемкости эталонного материала C_{P2}^0 , можно вычислить для исследуемого образца C_{P1}^0 значение его удельной теплоемкости с помощью следующего соотношения:

$$C_{P1}^0 = C_{P2}^0 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}, \quad (8)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ – масса 1-го образца, $m_2 = \rho_2 V_2$ – масса 2-го образца, $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$, $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$ – скорости охлаждения исследуемого и эталонного образцов соответственно при одинаковой температуре.

В нашем исследовании значения теплоемкости образцов осуществляли на специализированном измерительном комплексе, принципиальная схема которого приведена на рисунке 1.

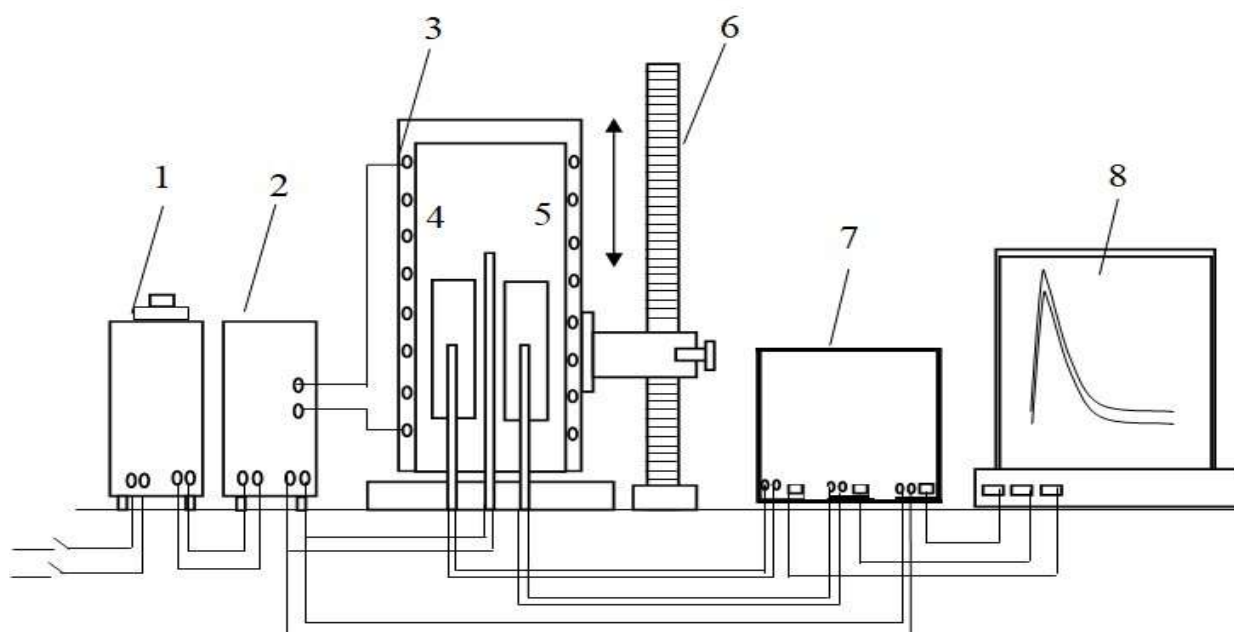


Рисунок 1. Схема термометрической экспериментальной установки для измерения теплоемкости твердых тел при охлаждении

Экспериментальный комплекс состоит из ряда основных элементов. Нагревательный блок – электропечь (3) смонтирована на вертикальной станине (6), обеспечивающей ее перемещение по вертикальной траектории, обозначенной стрелочным указателем. Испытуемые образцы (4) и калибровочные эталоны (5), обладающие кинематической свободой, выполнены в цилиндрической конфигурации с геометрическими параметрами $\varnothing 16 \times 30$ мм. В торцевой части каждого цилиндра выполнены технологические пазы для размещения термоэлектрических преобразователей (4 и 5), гарантирующих прецизионный температурный контроль. Сигналы с термопар поступают на многоканальный измерительный комплекс (7), интегрированный с вычислительной системой (8) для фиксации и последующего анализа экспериментальных данных.

Погрешность температурных измерений не превышает $\pm 1\%$ в интервале $40-400^\circ\text{C}$ и $\pm 2,5\%$ в области свыше 400°C . Методическая погрешность определения теплоемкости составляет менее 4% , что подтверждает высокую достоверность экспериментальных данных.

Полученные температурно-временные зависимости для исследованных сплавов с высокой точностью аппроксимируются уравнением следующей формы:

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (9)$$

где a , b , p , k – постоянные параметры, характеризующие данный образец, T – время охлаждения.

Проведя операцию дифференцирования уравнения (9) по времени T , было получено расчетное соотношение, позволяющее определить скорость охлаждения материала в процессе исследования:

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau}. \quad (10)$$

Путем анализа уравнения (10) были установлены значения скоростей охлаждения как для эталонного материала, так и для сплавов алюминий-железо.

Определение теплоемкости осуществлялось в режиме программируемого снижения температуры с использованием методических подходов, подробно описанных в научных публикациях [11, 12]. В ходе экспериментальных исследований изучалось изменение удельной теплоемкости и основных термодинамических параметров алюминиево-железных сплавов при температурных воздействиях в диапазоне 300–800 К. Графическое представление полученных зависимостей приведено на рисунке 2а.

Анализ кривых охлаждения показал, что температурные изменения для всех образцов происходят синхронно и демонстрируют схожую динамику. При этом на графиках не наблюдаются термические плато, которые могли бы свидетельствовать о наличии фазовых превращений или структурных переходов в исследуемых сплавах.

В результате анализа экспериментальных кривых охлаждения были определены численные значения параметров a , b , p , k , а также произведений ab , pk , входящих в уравнение (10). Все полученные коэффициенты представлены в сводной таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (10), характеризующие термофизические свойства алюминиево-железных сплавов

Содержание железа в алюминии марки А6, мас. %	a , К	$b \cdot 10^{-3}$, c^{-1}	p , К	$k \cdot 10^{-4}$, c^{-1}	$a \cdot b$, $K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}$, $K \cdot c^{-1}$
Эталон (А5N)	473,0850	4,67	344,7507	1,55	2,21	5,35
А6	480,7551	4,58	335,0815	1,27	2,20	4,26
0,5Fe	480,7312	4,58	332,6087	1,28	2,20	4,26
0,8Fe	480,7196	4,58	331,5208	1,29	2,20	4,27
1,0Fe	480,7111	4,58	330,7297	1,29	2,20	4,27
1,5Fe	480,7058	4,58	330,2352	1,29	2,20	4,27

Расчет скоростей охлаждения исследуемых образцов проводился на основе уравнения (10), позволяющего с высокой точностью оценить динамику температурных изменений. Графики, иллюстрирующие изменение скорости охлаждения алюминиево-железных сплавов, приведены на рисунке 2б.

Определение удельной теплоемкости алюминиево-железных сплавов осуществлялось на основе расчетов по формуле (8). В ходе анализа экспериментальных данных были получены температурные зависимости

теплоемкости как для исследуемых материалов, так и для эталонного образца – алюминия марки А5N. Формула, описывающая поведение теплоемкости в зависимости от температуры, имеет следующий вид:

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3, \quad (11)$$

где a , b , c , d – эмпирические параметры, определенные экспериментально для каждого конкретного образца, T – температура, при которой проводился расчет теплоемкости. Численные значения коэффициентов, входящих в уравнение (11), были получены в результате обработки экспериментальных кривых охлаждения (таблица 2).

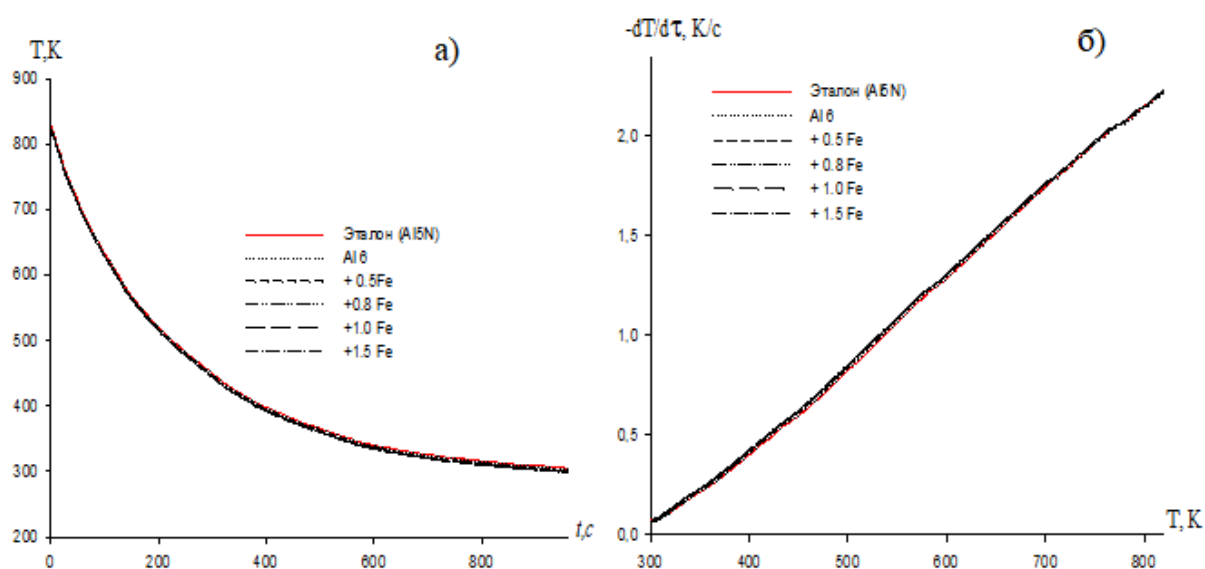


Рисунок 2. Динамика охлаждения: температурные и скоростные профили для сплавов Al–Fe и эталонного алюминия

Таблица 2. Расчетные коэффициенты a , b , c , d уравнения (11) для алюминия А6 с добавлением Fe

Содержание железа в алюминии марки А6, мас. %	a , Дж/(кг·К)	b , Дж/(кг·К ²)	c , Дж/(кг·К ³)	d , Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции R
Эталон (А5N)	690,3491	1,0100	-0,00127	0,000000913	1,0
А6	688,6392	1,0113	-0,00127	0,000000914	0,999
0,5Fe	687,2913	1,0112	-0,00127	0,000000914	0,999
0,8Fe	685,9206	1,0112	-0,00127	0,000000914	0,998
1,0Fe	685,0702	1,0111	-0,00127	0,000000913	0,998
1,5Fe	682,7891	1,0111	-0,00127	0,000000913	0,998

Таблица 3 содержит обобщенные результаты расчетов, отражающих температурную зависимость удельной теплоемкости для сплавов на основе алюминия с добавлением железа. Анализ представленных данных показывает, что по мере повышения температуры наблюдается закономерное увеличение

теплоемкости исследуемых материалов. В то же время рост концентрации железа в алюминиевой матрице приводит к снижению удельной теплоемкости.

Таблица 3. Параметры теплоемкости сплавов Al–Fe (кДж/(кг·К)) в температурном диапазоне

Содержание железа в алюминии марки А6, мас. %	Т, К					
	300	400	500	600	700	800
Эталон (А5N)	903,7001	949,5811	991,9741	1036,3571	1088,2081	1153,0051
А6	902,4072	948,4552	991,0392	1035,6432	1087,7512	1152,8472
0,5Fe	901,0293	947,0673	989,6413	1034,2353	1086,3333	1151,4193
0,8Fe	899,6586	945,6966	988,2706	1032,8646	1084,9626	1150,0486
1,0Fe	898,7512	944,7422	987,2452	1031,7382	1083,6992	1148,6062
1,5Fe	896,4701	942,4611	984,9641	1029,4571	1081,4181	1146,3251

На основе ранее вычисленных значений удельной теплоемкости алюминиево-железных сплавов, а также экспериментально определенных скоростей их охлаждения, был произведен расчет температурной зависимости коэффициента теплоотдачи $\alpha(T)$ как для эталонного материала – алюминия марки А5N, так и для исследуемых сплавов системы алюминий–железо. Расчет выполнялся по следующему выражению:

$$\alpha = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0) \cdot S} \quad (12)$$

Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи для алюминиево-железных сплавов представлена на рисунке 3. Анализ графиков демонстрирует четкую закономерность: по мере увеличения содержания железа в алюминиевой основе наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи. Это указывает на то, что легирование железом снижает интенсивность теплопередачи между материалом и окружающей средой, вероятно, за счет изменения микроструктуры и термодинамических характеристик сплава.

Для определения температурной зависимости термодинамических функций – таких как энтальпия, энтропия и энергия Гиббса – для алюминиево-железных сплавов были применены расчеты на основе интегральных выражений, включающих удельную теплоемкость. В качестве исходных данных использовались значения теплоемкости, полученные по уравнению (10), а сами вычисления проводились согласно формулам (13)–(15):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4), \quad (13)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3), \quad (14)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)]. \quad (15)$$

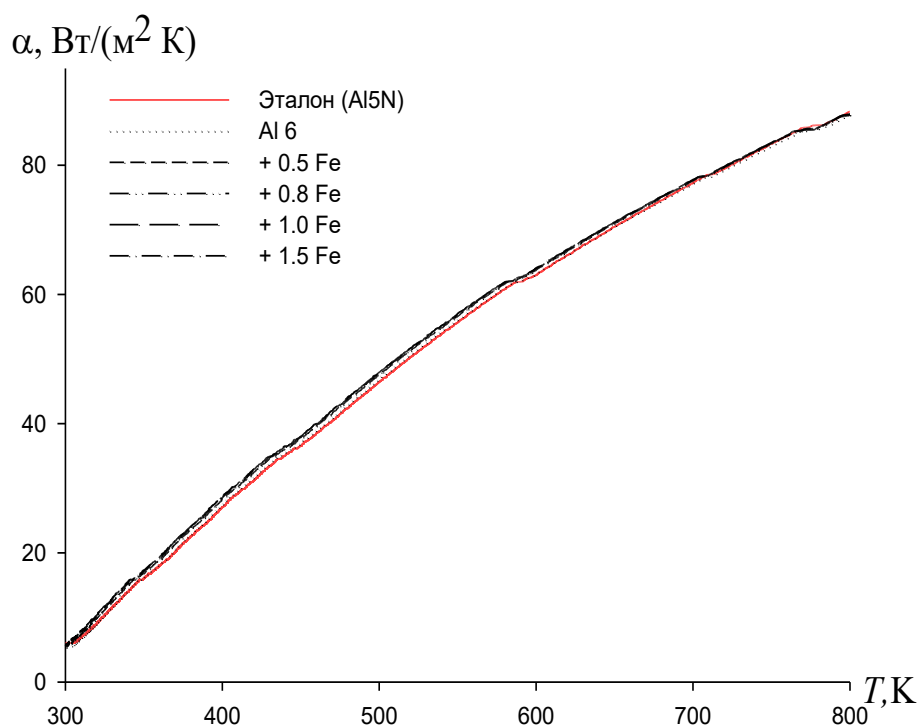


Рисунок 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры для сплавов Al–Fe и эталонного алюминия (марка А5N)

В таблице 4 представлены обобщенные результаты расчетов, отражающие изменения термодинамических функций (энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) для алюминиево-железных сплавов с шагом по температуре в 100 К. Эти данные получены на основе интегральных выражений, включающих удельную теплоемкость.

Анализ полученных данных показал, что в температурном диапазоне 300–800 К энтальпия и энтропия алюминиево-железных сплавов демонстрируют устойчивую тенденцию к увеличению с ростом температуры. При этом повышение содержания железа в алюминиевой матрице приводит к снижению этих термодинамических параметров. Энергия Гиббса, напротив, уменьшается с повышением температуры, проявляя противоположную зависимость по сравнению с энтальпией и энтропией.

Таблица 4. Изменение термодинамических функций алюминия марки А6 с добавлением Fe в зависимости от температуры

Содержание Fe в Al марки А6, мас. %	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов					
	300 К	400К	500К	600К	700К	800К
Эталон (А5N)	1,670998	94,38695	191,471	292,8481	398,9913	510,9213
А6	1,668603	94,26344	191,2442	292,5386	398,623	510,5218
0,5Fe	1,666055	94,1226	190,964	292,1182	398,0612	509,8178
0,8Fe	1,663519	93,983	190,6874	291,7044	397,5104	509,1299
1,0Fe	1,661841	93,8884	190,494	291,4038	397,0906	508,5751
1,5Fe	1,657621	93,65607	190,0336	290,7152	396,1739	507,4304
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг·К) для сплавов						
Эталон (А5N)	0,005587	0,271999	0,48846	0,67317	0,836688	0,986053
А6	0,005579	0,271641	0,487871	0,67243	0,835856	0,98518
0,5Fe	0,005571	0,271235	0,487154	0,671457	0,834666	0,983799
0,8Fe	0,005562	0,270832	0,486445	0,670498	0,833496	0,982447
1,0Fe	0,005557	0,270559	0,485953	0,66981	0,832624	0,981395
1,5Fe	0,005543	0,269889	0,484773	0,668215	0,830678	0,979144
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов						
Эталон (А5N)	-0,00517	-14,4125	-52,759	-111,054	-186,69	-277,922
А6	-0,00517	-14,393	-52,6914	-110,919	-186,477	-277,622
0,5Fe	-0,00516	-14,3713	-52,613	-110,756	-186,205	-277,222
0,8Fe	-0,00515	-14,3498	-52,5353	-110,594	-185,937	-276,827
1,0Fe	-0,00514	-14,3353	-52,4823	-110,482	-185,747	-276,541
1,5Fe	-0,00513	-14,2995	-52,3531	-110,214	-185,300	-275,885

$T_0 = 298,15 \text{ К}$.

Заключение

В рамках данного исследования удалось вывести аппроксимирующие полиномы, которые с высокой точностью описывают взаимосвязь между температурой и ключевыми термодинамическими характеристиками сплавов алюминия с железом. Полученные математические модели адекватно отражают поведение удельной теплоемкости, а также изменение таких фундаментальных функций, как энтальпия, энтропия и энергия Гиббса. Достоверность предложенных аппроксимаций подтверждается исключительно высоким коэффициентом детерминации, достигающим значения $R_{\text{кор.}}=0,998$. Проведенный анализ выявил четкую закономерность: при росте температуры наблюдается закономерное увеличение теплоемкости, энтальпии и энтропии, в то время как энергия Гиббса демонстрирует противоположную динамику, последовательно уменьшаясь. Кроме того, увеличение концентрации железа в сплаве оказывает умеренное влияние на снижение теплоемкости, что может быть связано с изменением фазового состава и структурной организации материала.

Список литературы

1. Луц А. Р., Суслина А. А. Алюминий и его сплавы: учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. 81 с.

2. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия. 1979. 640 с.
3. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник. Москва: Металлургия, 1989. 384 с.
4. Джалолов Ф. Н., Умарова Т. М. Синтез и физико-химические свойства сплавов системы Al-Fe (1,8%), модифицированных европием // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в городе Душанбе. 2017. 1 (3). 108–113.
5. Ташлыкова-Бушкевич И. И., Гутько Е. С., Шепелевич В. Г. Зависимость микроструктуры быстрозатвердевших сплавов Al-Fe от фазового состава // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 7-й Международной конференции, Минск, 26–28 сентября 2007 г. Минск: Изд. центр БГУ, 2007. 62–64.
6. Букин Д. О., Калинин А. А., Морозова А. И., Могучева А. А. Структура и свойства Al-Fe-Si-Zr сплава после ДТО // Тезисы докладов Международных конференций «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и «Химия нефти и газа» в рамках Международного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций», Томск, 1–5 октября 2018 г. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2018. 391–397. DOI: 10.17223/9785946217408/251
7. Прядезников Б. Ю., Тарасов П. П. Исследование процессов жидкофазного спекания сплавов системы Al-Fe с различными видами легирующей добавки // Богатство России: всероссийский форум научной молодежи, 4–6 декабря 2017 г.: сборник докладов. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 180–182.
8. Галанин С. И., Макшанчиков И. А. Особенности анодной поляризации алюминиевого сплава при электрохимическом оксидировании импульсами тока // Физика и химия обработки материалов. 2006. 5. 78–81.
9. Чинов В. Ю., Арышенский Е. В., Сарычев В. Д., Клепов Д. Н. Определение зависимости теплоёмкости от концентрации переходных металлов в алюминиевых сплавах на примере Al-Sc // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 15–16 мая 2024 г. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2024. С. 21–24.
10. Исмонов Р. Д. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АБ1 (Al+1%Be), модифицированного галлием // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2021. 3 (55). 31–34.
11. Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Одинаев Ф. Р., Якубов У. Ш., Кабутов К. Температурная зависимость теплоёмкости и изменений термодинамических функций сплава АЖ4,5 с висмутом // Металлы. 2020. 1. 21–29.
12. Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Одинаев Ф. Р., Якубов У. Ш., Кабутов К. Температурная зависимость теплоёмкости и изменение термодинамических функций сплава АЖ4.5 с оловом // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2019. 1. 50–58. DOI: 10.17073/0021-3438-2019-1-50-58

References

1. Lutz A. R., Suslina A. A. Aluminum and its alloys: a textbook. Samara: Samara State Technical University Publ., 2013. 81 p. (In Russian).
2. Mondolfo L. F. Structure and properties of aluminum alloys. Moscow: Metallurgy Publ., 1979. 640 p. (In Russian).
3. Zinoviev V. E. Thermophysical properties of metals at high temperatures: handbook. Moscow: Metallurgy Publ., 1989. 384 p. (In Russian).

4. Dzhallolov F. N., Umarova T. M. Synthesis and physico-chemical properties of alloys of the Al-Fe system (1.8%) modified with europium // Bulletin of the Branch of the Lomonosov Moscow State University in the city of Dushanbe. 2017. 1 (3). 108–113. (In Russian).
5. Tashlykova-Bushkevich I. I., Gutko E. S., Shepelevich V. G. Dependence of the microstructure of rapidly hardened Al-Fe alloys on the phase composition // Interaction of radiation with a solid: proceedings of the 7th international conference, Minsk, September 26-28, 2007. Minsk: BSU Publ., 2007. P. 62–64. (In Russian).
6. Bukin D. O., Kalinenko A. A., Morozova A. I., Mogucheva A. A. Structure and properties of the Al-Fe-Si-Zr alloy after DTO // Abstracts of the international conferences "Promising materials with a hierarchical structure for new technologies and reliable structures" and "Chemistry of oil and Gas" within the framework of the International Symposium "Hierarchical Materials: development and applications for new technologies and reliable structures", Tomsk, October 1–5, 2018. Tomsk: Tomsk State University Publ., 2018. P. 391–397. DOI: 10.17223/9785946217408/251 (In Russian).
7. Pryadeznikov B. Yu., Tarasov P. P. Investigation of the processes of liquid-phase sintering of alloys of the Al-Fe system with various types of alloying additives // The wealth of Russia: All-Russian scientific youth forum, December 4-6, 2017: collection of reports. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2018. P. 180–182. (In Russian).
8. Galanin S. I., Makshanchikov I. A. Features of anodic polarization of aluminum alloy during electrochemical oxidation by current pulses // Fizika i khimiya obrabotki materialov. 2006. 5. 78–81. (In Russian).
9. Chinov V. Yu., Aryshenskiy E. V., Sarychev V. D., Klepov D. N. Determination of the dependence of heat capacity on the concentration of transition metals in aluminum alloys using the example of Al-Sc // Science and youth: problems, searches, solutions: proceedings of the All-Russian scientific conference of students, postgraduates and young scientists, Novokuznetsk, May 15-16 2024. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University Publ., 2024. P. 21–24. (In Russian).
10. Ismonov R. D. temperature dependence of the heat capacity and change in the thermodynamic functions of the AB1 (AL+1% BE) alloy modified with gallium // Polytechnic bulletin. Series: engineering studies. 2021. 3 (55). 31–34. (In Russian).
11. Ganiev I. N., Safarov A. G., Odinaev F. R., Yakubov U. Sh., Kabutov K. Temperature dependence of the specific heat and the changes in the thermodynamic functions of a bismuth-bearing AZH4.5 alloy // Metally. 2020. 1. 21–29. (In Russian).
12. Ganiev I. N., Safarov A. G., Odinaev F. R., Yakubov U. Sh., Kabutov K. Temperature dependence of specific heat and thermodynamic functions of AL + 4,5 % FE alloys doped with tin // Izvestiya. Non-ferrous metallurgy. 2019. 1. 50–58. DOI: 10.17073/0021-3438-2019-1-50-58 (In Russian).

Информация об авторах

Сафаров Амиршо Гоибович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0009-0009-8517-3405, amirsho71@mail.ru

Бексеитова Гульмира Копшиловна – соискатель, Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0009-0004-5926-3232, g.bekseitova@agakaz.kz

Ганиев Изатулло Наврузович – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0000-0002-2791-6508, ganievizatullo48@gmail.com

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 622.279:543.27:621.384.3

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).455-467

Поступила в редакцию / Received 05.05.2025

ГРНТИ 52.47.25+31.19.29+47.55.31

Специальность ВАК 2.2.13.

Принята к публикации / Accepted 28.09.2025

Научная статья

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА ДАННЫХ В TDLAS-ГАЗОАНАЛИЗАТОРЕ

Хаджийская Е. Ю., Покровская М. В.

МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия)

Аннотация. В статье рассматривается разработка метода анализа данных для газоанализатора, основанного на методе перестраиваемой диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии, предназначенного для высокоточного измерения влажности в природном газе. Проблема точного контроля содержания водяных паров в газовой промышленности обусловлена рисками коррозии, образования кристаллогидратов и отказов оборудования, особенно при изменении термодинамических условий. Среди существующих методов измерения влажности метод перестраиваемой диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии выделяется высокой чувствительностью, стабильностью и минимальной зависимостью от давления и температуры. В статье подробно описана структурная схема работы анализатора, основанного на методе перестраиваемой диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии, включающая аппаратную и программную части. Аппаратная часть охватывает лазерный модуль, аналитический, реперный и базовый каналы, а также датчики давления и температуры. Программный блок включает алгоритмы вырезания спектральных участков, логарифмирования, нормализации и сопоставления с базой данных HITRAN. Особое внимание уделено методам коррекции спектральных помех, возникающих от примесей, таких как метан и углекислый газ. Представленный метод исключает необходимость прямого контакта чувствительных элементов с газовой смесью, снижая эксплуатационные затраты и обеспечивая устойчивую и точную работу системы даже при низкой концентрации влаги.

Ключевые слова: природный газ, влажность, диодная лазерная спектроскопия, анализатор влажности, обработка результатов

Для цитирования: Хаджийская Е. Ю., Покровская М. В. Разработка метода анализа данных в TDLAS-газоанализаторе // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 455–467. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).455-467

Research Article

DEVELOPMENT OF A DATA ANALYSIS METHOD IN A TDLAS GAS ANALYZER

Khadzhiyskaya E. Yu., Pokrovskaya M. V.

MIREA – Russian technological university (Moscow, Russia)

Abstract. In this article we discuss the development of a data analysis method for a gas analyzer based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), designed for high-precision measurement of moisture in natural gas. The problem of accurately monitoring water vapor content in the gas industry is driven by the risks of corrosion, hydrate formation, and equipment failures, especially under changing thermodynamic conditions. Among existing moisture measurement methods, tunable diode laser absorption spectroscopy stands out for its high sensitivity, stability, and minimal dependence on pressure and temperature. The article provides a detailed description of the structural diagram of the analyzer based on TDLAS, which includes both hardware and software components. The hardware part covers the laser module, analytical, reference, and baseline channels, as well as pressure and temperature sensors. The software block includes algorithms for spectral segment extraction, logarithmization, normalization, and comparison with the HITRAN database. Special attention is given to methods of correcting spectral interferences caused by impurities such as methane and carbon dioxide. The proposed method eliminates

the need for direct contact of sensitive elements with the gas mixture, reducing operational costs and ensuring stable and accurate system performance even at low moisture concentrations.

Keywords: *natural gas, moisture, diode laser spectroscopy, moisture analyzer, data processing*

For citation: Khadziyskaya E. Yu., Pokrovskaya M. V. Development of a data analysis method in a TDLAS gas analyzer // Vestnik NovSU. 3 (141). 455–467. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).455-467

Введение

Влажность природного газа является одним из важнейших параметров при его добыче из скважины, технологической переработке и транспортировке под давлением по магистральным трубопроводам.

Влажность необходимо измерять с высокой точностью. Даже небольшое количество H_2O в газе может привести к серьезным последствиям (коррозия, ледяные пробки, рост кристаллогидратов – в результате выход из строя оборудования). Также при изменении термодинамических условий влага имеет свойство осаждаться на стенках трубопровода.

Процессы осушки являются весьма дорогостоящими процедурами, проводить их без точного определения влажности экономически невыгодно.

В газовой промышленности используются различные гидрометры. Отличия в физическом принципе. Например, существуют анализаторы с «охлаждаемыми зеркалами» «Chilled mirrors» [1]; на основе P_2O_5 [2]; с емкостными датчиками [3].

У всех методов измерения есть свои плюсы и минусы, но основной проблемой является низкая точность. В связи с этим в последние десять лет нынешнего века отмечается рост продаж именно приборов, работающих по методу TDLAS.

Перестраиваемая диодно-лазерная абсорбционная спектроскопия (TDLAS) – прогрессивный метод, который применяют для обнаружения и измерения газов. В данном методе используются характеристики поглощения молекул газа в ответ на воздействие лазерного излучения. Основной принцип TDLAS основан на взаимодействии между настраиваемым диодным лазером и молекулами газа, при котором молекулы поглощают свет определенной длины волны, что позволяет проводить точные измерения концентрации газа [4].

Структурная схема газоанализатора

Впервые способ измерения количества влаги в природном газе методом TDLAS был описан в патенте США 7679059 от 16 марта 2010 года [5].

Анализаторы TDLAS позволяют измерять содержание влаги в режиме реального времени, преодолевая ограничения традиционных методов измерения, которые часто требуют сложной калибровки, что может привести к значительным погрешностям из-за колебаний давления.

Одним из ключевых преимуществ TDLAS является его способность напрямую измерять содержание влаги, не подвергаясь влиянию изменений температуры или давления пробы, в отличие от традиционных методов, упомянутых выше. Эта характеристика делает анализаторы TDLAS особенно эффективными для получения высокой точности при низком уровне влажности. Кроме того, анализаторы TDLAS практически не требуют технического обслуживания или капитального ремонта. Техническое обслуживание проводится только раз в пять лет, с простыми ежегодными проверками в промежутках, что снижает эксплуатационные расходы.

Еще одним важным преимуществом анализаторов, работающих по методу TDLAS, является чувствительность. Они могут определять концентрацию влаги до 1 промилле, что делает их пригодными для измерения остаточной влажности в сложных условиях, таких как, например, переработка природного газа.

Существенным минусом метода TDLAS являются примеси в газовой смеси. Присутствие других газов в смеси природного газа может привести к спектральным помехам, особенно от метана, этана и углекислого газа, что может затруднить точные измерения влажности. Эти помехи требуют использования специализированных алгоритмов анализа данных и методов калибровки для обеспечения точности измерения [5].

Электронные компоненты любого TDLAS-анализатора играют важную роль в обработке сигналов. Они отвечают за усиление обнаруженного сигнала, фильтрацию шума и преобразование. Более подробно принцип работы электронной части TDLAS-газоанализатора, показанной на рисунке 1, изложен в статье [6].

Метод, изложенный в данной статье, не требует использования датчиков, непосредственно контактирующих с изучаемой пробой природного газа, что устраняет необходимость замены чувствительных элементов при их загрязнении. Такой подход снижает в несколько раз затраты на эксплуатацию и упрощает обслуживание системы.

При прямом измерении поглощения длина волны (или, другими словами, по частоте излучения) диодного лазера изменяется сигналом перестройки – сканируется и регистрируется спектр пропускания.

Упрощенная структурная схема работы газоанализатора влажности в режиме прямого измерения поглощения показана на рисунке 2.

Схема, показанная на рисунке 2, представляет систему, в которой аппаратные и программные части взаимодействуют для измерения концентрации воды в газе с использованием диодной лазерной спектроскопии. Аппаратная часть (модули лазера и каналов) генерирует и регистрирует спектры, которые затем передаются в программную часть. Программная часть выполняет обработку данных: нормализацию, коррекцию и сопоставление с базой данных HITRAN [8]. Результаты расчетов, включая концентрацию воды и точку росы, выводятся на этапе итогового анализа. Таким образом, система представляет собой замкнутый цикл,

где аппаратная часть обеспечивает измерения, а программная часть отвечает за обработку и интерпретацию данных.



Рисунок 1. Структурная схема TDLAS-газоанализатора

Для начала разберем аппаратную часть (блок 1-5 на рисунке 2).

Блок 1 «Модуль диодного лазера (ДЛ)»: основной источник излучения, который генерирует лазерный свет. Система термоэлектрического охлаждения, основанная на элементе Пельтье (TEC: Thermoelectric Cooler – термоэлектрический охладитель), поддерживает стабильную температуру лазера.

Блок 2 «Аналитический канал»: лазерный луч направляется через газовый поток в аналитической кювете, где измеряется поглощение излучения молекулами воды.

Блок 3 «Реперный канал»: данный канал используется для сравнения с реперным (эталонным) газом. Он помогает исключить внешние помехи и откалибровать измерения.

Блок 4 «Канал базовой линии»: служит для измерения фонового сигнала, который не связан с молекулярным поглощением. Он используется для корректировки и повышения точности анализа.

Блок 5 «Датчики давления и температуры»: измеряются параметры среды (давление и температура), которые необходимы для расчетов и нормализации спектров.

Рассмотрим кратко программную часть. Она состоит из трех частей: предварительная обработка сигналов (блок 6–13 на рисунке 2), анализ спектров (блок 14–25 на рисунке 2) и построение и синтез спектров (блок 19–25 на рисунке 2).

Блоки 6–8 «Вырезание рабочей области»: из спектров аналитического, реперного и базового каналов выделяются только те участки, которые содержат полезную информацию.

Блоки 9–11 «Вычитание оптического нуля»: для каждого спектра удаляется базовый уровень (оптический ноль), чтобы исключить фоновые помехи.

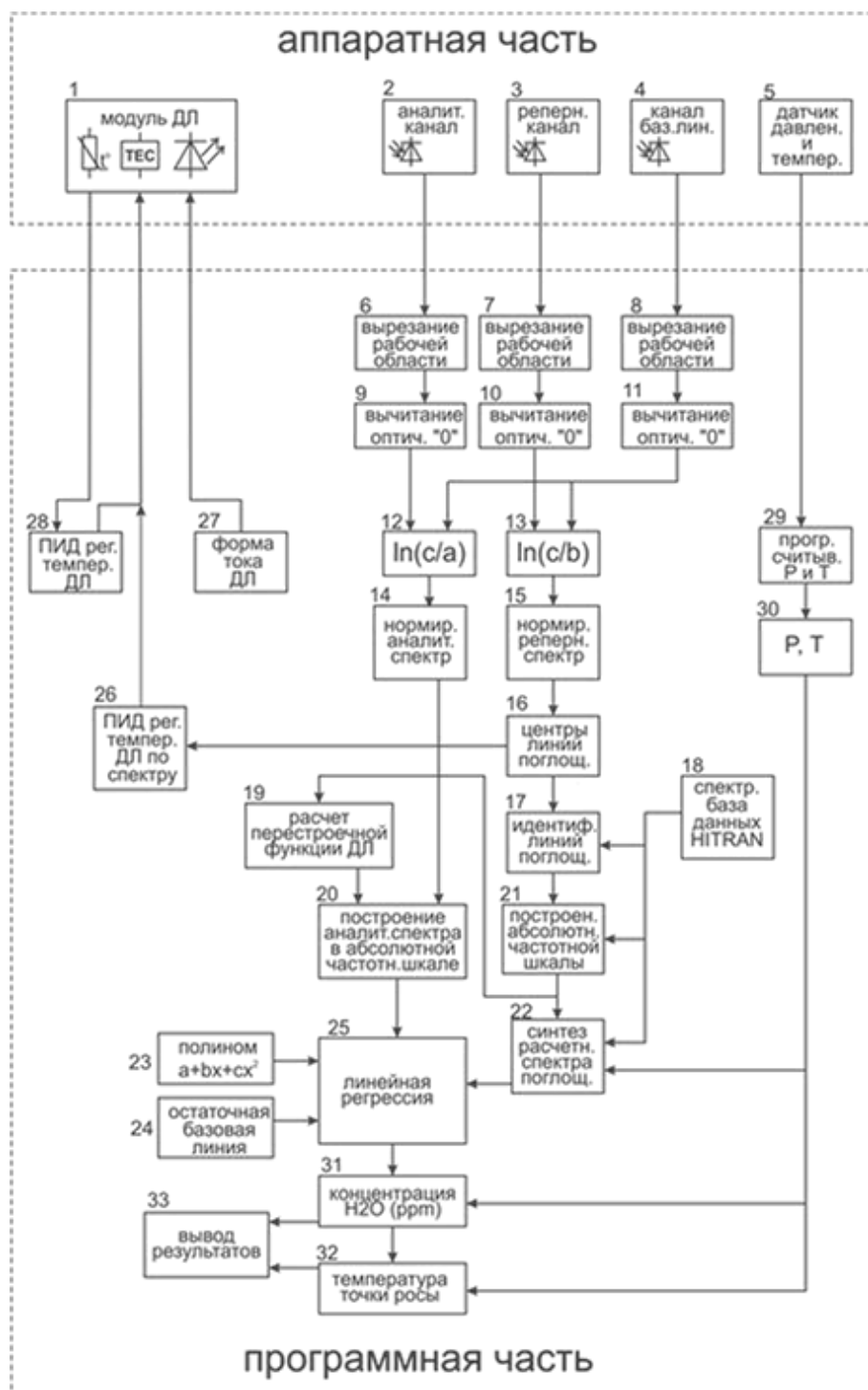


Рисунок 2. Упрощенная структурная схема работы газоанализатора в режиме прямого измерения поглощения

Блоки 12–13 «Логарифмические преобразования»: данные шаги позволяют нормализовать спектры, чтобы выделить информацию о молекулах воды.

Блоки 14–15 «Нормированные спектры»: после вычитания и нормализации спектры аналитического и реперного каналов подготавливаются к дальнейшему анализу.

Блоки 16–17 «Центры линии поглощения и их идентификация»: на основе данных спектра определяется положение линий поглощения молекул воды, которые затем сопоставляются с базой данных HITRAN.

Блок 18 «База данных HITRAN»: эта база предоставляет точные спектральные данные для молекул. Она используется для идентификации и расчета концентрации воды.

Блоки 19–22 «Расчет перестроенной функции и построение частотной шкалы»: измеренные спектры переводятся в абсолютную частотную шкалу, где они сравниваются с эталонным спектром.

Блоки 23–24 «Аппроксимация и коррекция базовой линии»: для учета нелинейностей проводится аппроксимация базовой линии с помощью полинома, а остаточные отклонения корректируются.

Блок 25 «Линейная регрессия»: метод используется для количественного анализа концентрации воды, основываясь на вычисленных параметрах спектра.

Последним этапом работы системы мониторинга в режиме прямого измерения поглощения является расчет результатов.

Блоки 26–28 «Регуляция параметров лазера»: температура и ток диодного лазера регулируются для поддержания стабильной работы системы.

Блоки 29–30 «Данные давления и температуры»: используются для учета влияния окружающих условий на спектральные характеристики.

Блоки 31–33 «Расчет концентрации воды и температуры точки росы»: на выходе система выдает концентрацию воды в ppm (миллионных долях) и температуру точки росы, которая зависит от содержания водяного пара.

Принцип работы анализатора влажности в режиме прямого измерения поглощения.

Для сканирования частоты излучения на диодный лазер (блок 1) подается периодический ток инжекции специальной формы, который рассчитывается в программе (блок 27) (рисунок 3).

В процессе тока инжекции можно выделить три стадии:

1. Нулевой ток (лазер выключен), где фиксируется электрический уровень оптического нуля.

2. Период, когда диодный лазер выходит на стационарный рабочий режим. Это неактивная зона с постоянным током инжекции, необходимая для завершения переходных процессов в лазере после его включения.

3. Основная рабочая стадия, на которой ток инжекции постепенно увеличивается, что вызывает перестройку и, как следствие, сканирование длины волны излучаемого лазером света [9].

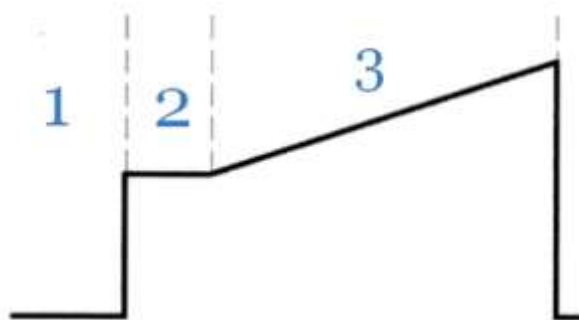


Рисунок 3. Форма тока инжекции диодного лазера

Излучение диодного лазера регистрируется в трех оптических каналах – в аналитическом (блок 2), реперном (блок 3) и в канале базовой линии (блок 4). После усиления эти сигналы поступают в МФУ (многофункциональное устройство) ввода-вывода NI-USB-6366 и оцифровываются с частотой 2 МГц и дискретностью 16 бит. Оптимальные значения были подобраны в ходе эксперимента.

Затем из всех трех сигналов вырезается основная рабочая область спектра, в которой происходит поглощение на нужной длине волны (частоте), то есть область 3 на рисунке 3 (блоки 6, 7, 8). Уровень электрического нуля на выходах усилителей фотодиодов не соответствует уровню оптического нуля. Это связано с разными причинами – смещение нуля в операционных усилителях, фоновая засветка фотодиодов и другие факторы. Поэтому необходимо провести корректировку уровня электрического нуля.

Электрический сигнал, соответствующий уровню оптического нуля, регистрируется в области 1 на рисунке 3, поскольку в этой части периода лазер выключен. Сигнал в области 1 (точнее, от 10 до 90% области 1, чтобы избежать разных краевых эффектов рядом с фронтами импульса) усредняется и полученное значение вычитается из области 3. В результате получаются три спектра пропускания с правильным значением оптического нуля (блоки 9, 10, 11).

Для дальнейшей обработки производится нормировка аналитического и реперного сигналов по базовой линии (блоки 12, 13).

После логарифмирования нормированных сигналов получаем спектр поглощения (рисунок 4) в аналитическом (блок 14) и реперном (блок 15) каналах:

$$\ln[(I_b(\nu)/I_i(\nu))] = \kappa(\nu) \cdot L + c, \quad (1)$$

где $I_i(\nu)$ – интенсивность излучения (спектр пропускания) в аналитическом либо в реперном канале, $I_b(\nu)$ – интенсивность в канале базовой линии, $\kappa(\nu)$ – коэффициент поглощения в соответствующем канале, L – длина оптического пути, c

– константа, связанная с различными интенсивностями в разных каналах (при одинаковых интенсивностях $c=0$).

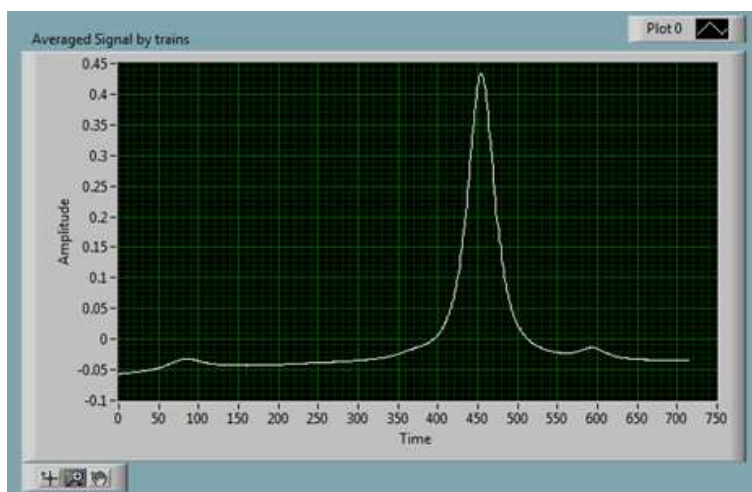


Рисунок 4. Спектр поглощения в реперном канале

На следующем этапе определяются центры линий поглощения воды в реперном канале (блок 16). Для этого прежде всего спектр поглощения в реперном канале сглаживается фильтром Савицкого-Голая [10] для удаления высокочастотного шума.

Затем берется вторая производная от сглаженного спектра и находятся все локальные максимумы второй производной, которые выше установленного порога.

Далее окрестности этих максимумов аппроксимируются гауссовской функцией определенной ширины, и затем находятся положения максимумов гауссовских пиков. Это позволяет избежать нахождения ложных шумовых пиков и значительно повысить точность нахождения центров линий поглощения.

После этого необходимо идентифицировать найденные линии поглощения, то есть соотнести каждый найденный пик с абсолютным значением оптической частоты (длины волны) (блок 17). Для этого используются полученные данные об интенсивностях и взаимном расположении пиков в реперном спектре поглощения, а также используются соответствующие данные из спектральной базы HITRAN-2020 (блок 18).

На первом этапе калибровки, считая приращение частоты генерации лазера строго пропорциональным приращению тока инжекции ($\Delta\nu \sim \Delta j_{\text{инж}}$) и зная приблизительный (средний) коэффициент пропорциональности b , каждому значению тока инжекции ставится в соответствие относительная частота:

$$\nu_{\text{отн}}(j) = (j - j_0) \cdot b, \quad (2)$$

где j_0 – начальное значение тока инжекции, подаваемого на лазер в ходе его частотной перестройки. Далее ищутся положения $\nu_{\text{отн}}^n$ и интенсивности A_n

максимумов линий в спектре поглощения (где n является индексом линии поглощения, соответствующей ее расположению на частотной шкале по отношению к остальным найденным линиям в изучаемом спектре) [11].

Приведенные выше действия позволяют получить два массива: частотный и амплитудный $[v_{\text{отн}}]$, $[A]$. Массивы формируются в формате базы данных HITRAN-2020 с числом данных, ограниченных количеством регистрируемых спектральных линий поглощения [11].

Для упрощения расчетов в дальнейшем частотный массив нормируется следующим образом:

$$v1_{\text{отн}}^n = v_{\text{отн}}^n - v_{\text{отн}}^0. \quad (3)$$

После такой нормировки нулевой отсчет в шкале частот соответствует первой линии массива.

Осуществляется уточнение частот линий поглощения с привязкой их к базе данных HITRAN-2020. Для этого первая линия массива $v1_{\text{отн}}^0$ совмещается с одной из линий базы данных HITRAN-2020 (v_{HITRAN}), в результате чего остальные линии этого массива получают новые значения, равные:

$$v2_{\text{отн}}^n = v1_{\text{отн}}^n + v_{\text{HITRAN}}. \quad (4)$$

Далее элементы массива $[v2_{\text{отн}}]$ совмещаются с ближайшими по спектру линиями из базы данных HITRAN-2020, при этом интенсивности соответствующих линий базы данных HITRAN-2020 образуют массив $[A_{\text{hit}}]$, по размеру эквивалентный массиву $[A]$, который служит уже для процедуры сравнения амплитудных характеристик базы HITRAN-2020 с полученным спектром. На основе проведенных экспериментов был сделан вывод, что, если добавить к интенсивностям линий поглощений шума на уровне 20% от средней интенсивности, корреляционное сравнение массивов $[A]$ и $[A_{\text{hit}}]$ может приводить к ошибочным результатам калибровки. По этой причине для корреляционного анализа были выбраны соотношения между соседними спектральными линиями в спектре как наиболее подходящие характеристики.

Таким образом, производится преобразование массивов $[A]$ и $[A_{\text{hit}}]$ в их характеристические массивы $[B]$ и $[B_{\text{hit}}]$, после чего вычисляется коэффициент корреляции для данной пары массивов $\text{corr}\{[B], [B_{\text{hit}}]\}$. Элементы характеристических массивов и коэффициент корреляции определяются следующими соотношениями:

$$B_l = A_{n+1}/A_n, \quad (5)$$

$$Bhit_l = Ahit_{n+1}/Ahit_n, \quad (6)$$

$$corr\{[B], [Bhit1]\} = \frac{\sum_l (B_l - \bar{B}) \cdot (Bhit_l - \bar{Bhit})}{\sqrt{\sum_l (B_l - \bar{B})^2 \cdot \sum_l (Bhit_l - \bar{Bhit})^2}}, \quad (7)$$

где l – индекс элемента массива. Такая операция проводится для всех линий спектрального диапазона из базы HITRAN-2020 вблизи области генерации лазера. Частотная привязка линий поглощения выполняется на основе максимального значения корреляции между положением линий измеренного спектра и линиями спектрального участка из базы данных HITRAN-2020.

В результате имеем абсолютные значения частот в нескольких точках из всей области перестройки диодного лазера.

Для построения абсолютной частотной шкалы во всей области перестройки лазера необходимо выполнить интерполяцию и экстраполяцию частот в найденных пиках поглощения (блок 21). Для этого используется кубическая сплайн-интер-экстраполяция. В результате можем рассчитать перестроечную функцию диодного лазера, то есть зависимость абсолютной оптической частоты от номера точки (отсчета), регистрируемого АЦП (блок 19).

Далее, используя перестроечную функцию диодного лазера, строится измеряемый спектр поглощения в аналитической кювете в абсолютной частотной шкале (блок 20).

Затем нужно рассчитать и синтезировать (создать модельный) образцовый спектр водяного пара в этой же абсолютной частотной шкале (блок 22). При расчете формы спектральных линий используется фойгтовский контур поглощения [12].

Для синтеза спектра кроме самой частотной шкалы нужны следующие данные:

- частоты центров линий поглощения в рабочей области перестройки диодного лазера, а также за границами этой области в пределах 3–5 см⁻¹;
- сечения поглощения для этих линий;
- энергия нижнего уровня каждого соответствующего колебательно-вращательного перехода;
- коэффициенты столкновительного уширения каждой линии в буферном газе;
- температурная зависимость коэффициентов столкновительного уширения;
- коэффициенты столкновительного сдвига каждой линии;
- давление газа в аналитической кювете;
- температура газа в аналитической кювете.

Все спектральные параметры (первые 6 из перечисленных) берутся из базы данных HITRAN-2020, хотя следует заметить, что их точность часто бывает недостаточной, поэтому в процессе отладки прибора их необходимо корректировать.

Последние два параметра (давление и температура газа в аналитической кювете) определяются по датчику в кювете (блок 5). Точность температуры газа должна равняться 0,5 ОС, а точность давления газа – 1 мБар. Датчик BMP280 от фирмы Bosch вполне удовлетворяет этим требованиям.

Заключение

В рамках настоящего исследования был разработан и реализован метод анализа данных для TDLAS-газоанализатора, предназначенного для высокоточного определения влажности в природном газе. Применение перестраиваемой диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии позволило достичь высокой чувствительности и надежности измерений, особенно в условиях низких концентраций водяного пара, что является критически важным для контроля качества и безопасности на всех этапах газопереработки и транспортировки.

Разработанная система охватывает полный цикл обработки измерительного сигнала: от формирования и регистрации спектров в оптических каналах до детального программного анализа с использованием спектральной базы HITRAN и методов аппроксимации и регрессии. Существенным преимуществом предложенного подхода является отказ от прямого контакта чувствительных элементов с исследуемой средой, что значительно снижает эксплуатационные издержки и увеличивает срок службы оборудования.

Кроме того, внедренный метод калибровки по спектральным линиям реперного канала, а также учет нелинейностей перестройки частоты лазера обеспечили высокую точность сопоставления измеренных спектров с эталонными данными. Это позволило эффективно компенсировать спектральные помехи от сопутствующих компонентов газовой смеси и повысить достоверность результатов.

Пока на данном этапе обработки данных имеется два спектра: синтезированный образцовый спектр поглощения водяного пара и измеренный спектр поглощения в аналитической кювете, причем оба эти спектра построены в одной частотной шкале и при одинаковых условиях. Остается последний шаг – сравнить эти два спектра, а именно вычислить, сколько долей образцового спектра содержится в измеряемом аналитическом спектре.

Список литературы

1. Карюк В. М., Выкубенко О. Б. Патент № 90904 U1 Российская Федерация, МПК G01N 15/00. Устройство для измерения содержания водяного пара в природном газе: № 2009107840/22: заявл. 05.03.2009: опубл. 20.01.2010.

2. Габрусенок П. С. Патент № 2263936 С2 Российская Федерация, МПК G01W 1/11, G01N 25/56. Электролитический датчик влажности: № 2003106741/28: заявл. 11.03.2003; опубл. 10.11.2005; заявитель Войсковая часть 70170.
3. Галушкин С. С. Патент № 2296318 С1 Российская Федерация, МПК G01N 27/22. Емкостный датчик влажности: № 2005137258/28: заявл. 30.11.2005; опубл. 27.03.2007; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет)».
4. Степанов Е. В. Диодная лазерная спектроскопия и анализ молекул-биомаркеров. Москва: Физматлит, 2009. 416 с.
5. Xin Zhou. Patent N 5,777,329 A US 7,679,059 B2. Measuring water vapor in (10): N 60/793.404: Appl. No.: 11/715.599: Filed: Mar. 7, 2007; Assignee: Spectra Sensors, Inc., Rancho Cucamonga, CA (US). 24 p.
6. Хаджийская Е. Ю. Разработка электронных блоков анализатора влажности природного газа // Вестник Новгородского государственного университета. 2023. 1 (130). 146–157. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).146-157
7. TDLAS Analyzers & Hygrometers | Baker Hughes DS. URL: <https://www.haulage365.com/panametrics/process-analyzers/moisture-analyzers/tdlas-hygrometer> (Дата обращения: 27.01.2025).
8. The HITRAN Database // HITRAN online. URL: <https://hitran.org/> (Дата обращения: 15.02.2025).
9. Хаджийская Е. Ю., Покровская М. В. Выбор диодного лазера при проектировании устройства для оценки влажности природного газа // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем (Радиоинфоком-2022): сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции, Москва, 06–10 июня 2022 года. Москва: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. С. 659–661.
10. Никонов А. В., Давлетшин Р. В., Яковлева Н. И., Лазарев П. С. Фильтрация методом Савицкого-Голея спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств // Успехи прикладной физики. 2016. 4 (2). 198–205.
11. Мирончук Е. С., Николаев И. В., Очкин В. Н., Родионова С. С., Спиридонов М.В., Цхай С.Н. Измерение отношения концентраций изотопов ^{13}C и ^{12}C при атмосферном давлении по поглощению излучения диодного лазера углекислым газом в области 2 мкм // Квантовая электроника. 2009. 39 (4). 388–391.
12. Херсонский В.К. О математических свойствах фойгтовского профиля спектральной линии // Астрофизические исследования. 1982. 15. 75–87.

References

1. Karyuk V. M., Vyskubenko O. B. Patent No. 90904 U1 Russian Federation, IPC G01N 15/00. Device for measuring the water vapor content in natural gas: No. 2009107840/22: application 05.03.2009: published 20.01.2010. (In Russian).
2. Gabrusenok P. S. Patent No. 2263936 C2 Russian Federation, IPC G01W 1/11, G01N 25/56. Electrolytic humidity sensor: No. 2003106741/28: application 11.03.2003: published 10.11.2005; applicant Military unit 70170. (In Russian).
3. Galushkin S. S. Patent No. 2296318 C1 Russian Federation, IPC G01N 27/22. Capacitive humidity sensor: No. 2005137258/28: application 30.11.2005: published on 27.03.2007; applicant State Educational Institution of Higher Professional Education

"St. Petersburg State Mining Institute named after G.V. Plekhanov (Technical University)". (In Russian).

4. Stepanov E. V. Diode laser spectroscopy and analysis of biomarker molecules. Moscow: Fizmatlit, 2009. 416 p. (In Russian).

5. Xin Zhou. Patent N 5,777,329 A US 7,679,059 B2. Measuring water vapor in (10): N 60/793.404: Appl. No.: 11/715.599: Filed: Mar. 7, 2007; Assignee: Spectra Sensors, Inc., Rancho Cucamonga, CA (US). 24 p.

6. Khadziyskaya E. Yu. Development of electronic blocks of the analyzer of humidity of natural gas // Vestnik NovSU. 2023. 1 (130). 146–157. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).146-157 (In Russian).

7. TDLAS Analyzers & Hygrometers | Baker Hughes DS URL: <https://www.haulage365.com/panametrics/process-analyzers/moisture-analyzers/tdlas-hygrometer> (Accessed: 15.10.24)

8. The HITRAN Database // HITRAN online. URL: <https://hitran.org/> (Accessed:15.02.2025).

9. Khadziyskaya E. Yu., Pokrovskaya M. V. The choice of a diode laser in the design of a device for assessing the humidity of natural gas // Actual problems and prospects for the development of radio engineering and information communication systems" (Radioinfocom-2022): Collection of scientific articles based on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Moscow, 06–10 June 2022. Moscow: MIREA – Russian Technological University Publ., 2022. 659–661. (In Russian).

10. Nikonov A. V., Davletshin R. V., Yakovleva N. I., Lazarev P. S. Filtering by the Savitsky-Goley method of spectral sensitivity characteristics of matrix photodetectors // Successes of applied Physics. 2016. 4 (2). 198–205. (In Russian).

11. Mironchuk E. S., Nikolaev I. V., Ochkin V. N., Rodionova S. S., Spiridonov M. V., Tskhai S. N. Measurement of the ratio of concentrations of isotopes ^{13}C and ^{12}C at atmospheric pressure by absorption of diode laser radiation by carbon dioxide in the region of 2 microns // Quantum Electronics. 2009. 39 (4). 388–391. (In Russian).

12. Khersonsky V.K. On the mathematical properties of the Voigt profile of a spectral line // Astrophysical Research.1982.15. 75–87. (In Russian).

Информация об авторах

Хаджийская Елизавета Юрьевна – аспирант, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-9115-9871, lizahajiiskaya@yandex.ru

Покровская Марина Владимировна – доцент, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0009-0004-8571-4893, mar-pokrovskaya@yandex.ru

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.396.969:004.89

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).468-483

Поступила в редакцию / Received 09.07.2025

ГРНТИ 47.49.29+28.23.29

Специальность ВАК 2.2.16.

Принята к публикации / Accepted 24.09.2025

Научная статья

КОГНИТИВНЫЕ РЕГИОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

Хомяков А. В., Логвинов С. С., Хомяков К. А., Лазин Ю. А.

Центральное конструкторское бюро аппаратостроения (Тула, Россия)

Аннотация. В статье представлен концептуальный подход к построению единого радиолокационного поля на основе когнитивной архитектуры с интеграцией технологий искусственного интеллекта. Обоснована необходимость перехода от традиционных систем контроля воздушного пространства к когнитивной системе, способной к обучению, адаптации и прогнозированию. Ключевым элементом является параллельное внедрение кластера искусственного интеллекта, обеспечивающего обработку данных в реальном времени без вмешательства в существующие контуры управления ситуационного центра. Модуль искусственного интеллекта функционирует как интеллектуальное расширение, снижая когнитивную нагрузку операторов и повышая устойчивость системы контроля воздушного пространства к современным угрозам, включая массовые атаки беспилотных летательных аппаратов и помеховые воздействия. Подчеркивается возможность эволюционного внедрения без остановки работы действующих систем, а также совместимость с мультисенсорной инфраструктурой. Предложенное решение формирует основу для устойчивой, масштабируемой и интеллектуальной системы обеспечения воздушной безопасности нового поколения.

Ключевые слова: *система контроля воздушного пространства, искусственный интеллект, когнитивная радиолокация, радиолокационное поле*

Для цитирования: Хомяков А. В., Логвинов С. С., Хомяков К. А., Лазин Ю. А. Когнитивные региональные системы контроля воздушного пространства // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 468–483. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).468-483

Research Article

COGNITIVE REGIONAL AIRSPACE SURVEILLANCE AND CONTROL SYSTEMS

Khomyakov A. V., Logvinov S. S., Khomyakov K. A., Lazin Y. A.

Central Design Bureau of Machine Building (Tula, Russia)

Abstract. The article presents a conceptual approach to building a unified radar field based on a cognitive architecture integrating artificial intelligence technologies. The necessity of transitioning from traditional airspace control systems to a cognitive system capable of learning, adaptation, and prediction is substantiated. A key element is the parallel implementation of an artificial intelligence cluster that enables real-time data processing without interfering with the existing control loops of the situation center. The AI module functions as an intelligent extension, reducing the cognitive load on operators and enhancing the resilience of the airspace control system to modern threats, including mass unmanned aerial vehicle attacks and electronic interference. The approach emphasizes the possibility of evolutionary implementation without interrupting the operation of existing systems, as well as compatibility with a multisensory infrastructure. The proposed solution forms the foundation for a sustainable, scalable, and intelligent next-generation airspace security system.

Keywords: *airspace control system, artificial intelligence, cognitive radar, radar field*

For citation: Khomyakov A. V., Logvinov S. S., Khomyakov K. A., Lazin Y. A. Cognitive regional airspace surveillance and control systems // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 468–483. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).468-483

Введение

Сегодня мы сталкиваемся с беспрецедентными вызовами в области контроля воздушного пространства. Рост числа беспилотных летательных аппаратов, появление высокоразвитых группировок малых дронов, сложные погодные условия и постоянно возрастающий объем обрабатываемых данных увеличивают оперативную нагрузку на радиолокационные системы и системы контроля воздушного пространства в целом, снижая эффективность ее применения. Операторы часто испытывают перегрузку (рисунок 1), сталкиваясь с огромным количеством данных, из-за чего возрастает вероятность ошибок и промедлений в принятии решений.



Рисунок 1. Типовой ситуационный центр принятия решений

В ответ на эти вызовы разрабатываются инновационные решения, основанные на адаптации когнитивных технологий и искусственного интеллекта в радиолокации и системах контроля воздушного пространства. Эти технологии позволяют радикально изменить подходы к контролю воздушного пространства, создавая новую парадигму, объединяющую достижения науки и техники.

Данная статья рассматривает роль когнитивных систем на основе искусственного интеллекта в повышении эффективности и производительности существующих систем контроля воздушного пространства на базе применяемых радиолокационных станций и автоматизированных рабочих мест операторов в контексте региональных ситуационных центров.

Мы подробно опишем аппаратно-программные компоненты, лежащие в основе этих инновационных систем, и оценим перспективы их дальнейшего развития. Особое внимание уделяется тому, как внедрение искусственного интеллекта способно

коренным образом трансформировать функционирование распределенной системы радиолокационных станций [1, 2], сделать ее более эффективной и надежной в обеспечении безопасности воздушного пространства.

Воздушная угроза нового времени и необходимость когнитивного подхода

Современная воздушная обстановка характеризуется значительным усложнением и высокой степенью неопределенности, что вызвано ростом использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Эти платформы становятся все более разнообразными, технологически совершенными и представляют собой многоаспектную угрозу, охватывающую широкий спектр применений [3].

Использование БПЛА в современных угрозах

Разведывательные операции

БПЛА позволяют нарушителям вести скрытое наблюдение за стратегическими объектами и перемещениями войск, обеспечивая получение оперативной информации в режиме реального времени. Их малая заметность и автономность затрудняют обнаружение и противодействие, повышая эффективность разведки и снижая риск для персонала нарушителя.

Доставка взрывчатых веществ

Использование дронов для доставки взрывчатки или других поражающих элементов делает возможным проведение дистанционных атак на объекты с высокой степенью защиты, что значительно расширяет тактические возможности атакующих.

Электромагнитные атаки на инфраструктуру

БПЛА могут нести специализированное оборудование для проведения электромагнитных воздействий (например, генераторы импульсов или средства радиоэлектронной борьбы), направленных на вывод из строя критических систем управления и связи, что парализует работу инфраструктуры без необходимости физического проникновения.

Химические и биологические атаки

Использование беспилотников для доставки или распыления химических и биологических агентов открывает новые горизонты для проведения асимметричных и скрытных атак с потенциально катастрофическими последствиями для населения и военных сил.

Нарушение работы аэродромов

Атаки БПЛА способны вывести из строя или значительно ограничить работу аэродромов и авиационной инфраструктуры, что приводит к срыву планов, задержкам и риску авиационных происшествий. При этом комплексная защита таких объектов

от малогабаритных и быстро маневрирующих целей требует высокотехнологичных средств обнаружения и нейтрализации.

Роевые атаки БПЛА

Перегрузка систем ПВО множеством целей

Роевые тактики создают «эффект лавины» [4, 5] для средств ПВО, когда их возможности распознавания и обработки информации становятся узким местом. Системы оказываются неспособными эффективно выделить реальные угрозы среди многочисленных объектов, что ведет к снижению вероятности успешного перехвата.

Пробитие обороны путем насыщения

Массовое одновременное появление множества БПЛА позволяет «пробить» оборону путем создания чрезмерной нагрузки, в результате чего часть угроз проходит незамеченной или необработанной. Это требует принципиально новых архитектур систем защиты с распределенной обработкой и приоритетным управлением угрозами.

Парализация критической инфраструктуры

Координированные атаки способны нарушить работу объектов энергетики, связи, транспорта и управления, что приводит к существенным перебоям или полной остановке функционирования. Такое состояние, даже если временное, может вызвать катастрофические последствия как в военном, так и в гражданском контексте.

Дополнительные осложняющие факторы

Усложнение помеховой обстановки

Современные радиоэлектронные средства и массовое использование радиочастотного спектра создают насыщенную помехами среду, снижая эффективность обнаружения и идентификации целей. Это требует внедрения адаптивных алгоритмов подавления помех и повышения селективности систем.

Влияние метеоусловий

Погодные условия (дождь, туман, снег, сильный ветер) существенно влияют на характеристики распространения радиоволн и работу оптических систем, снижая качество и достоверность данных. Когнитивные системы должны учитывать эти факторы при принятии решений и адаптировать параметры работы сенсоров.

Активность биообъектов (птиц, насекомых)

Биологические объекты часто имитируют сигнатуры малоразмерных летательных аппаратов, создавая ложные цели и усложняя задачу классификации. Для эффективного фильтрования таких помех требуется глубокий анализ сигнатур и применение методов машинного обучения.

Когнитивный подход как решение современных вызовов

В условиях стремительно меняющейся и насыщенной угрозами воздушной среды традиционные методы обнаружения и идентификации требуют модернизации

и новой оптимизации. Когнитивные системы, основанные на принципах саморегуляции, обучения и адаптации, позволяют:

- автоматически различать и классифицировать широкий спектр целей, опираясь на комплексный анализ временных, частотных, пространственных и поведенческих признаков;
- прогнозировать поведение объектов с целью заблаговременного определения угроз и выбора оптимальных стратегий реагирования;
- адаптироваться к динамике радиочастотной, метео- и помеховой обстановки, повышая устойчивость и точность обнаружения;
- оперативно принимать решения и корректировать параметры работы оборудования в режиме реального времени, минимизируя влияние человеческого фактора и снижая время реакции.

Таким образом, внедрение когнитивных технологий становится необходимым и перспективным направлением для обеспечения эффективной защиты воздушного пространства и безопасности критически важных объектов в условиях современных и будущих вызовов.

Когнитивная архитектура контроля воздушного пространства: эволюционное внедрение модуля искусственного интеллекта

Одним из ключевых достоинств предлагаемой когнитивной архитектуры (рисунок 2) является возможность поэтапной интеграции высокопроизводительного кластера с функциями искусственного интеллекта в существующую систему контроля воздушного пространства ситуационного центра. В отличие от традиционных модернизаций, требующих остановки или глубокой реконфигурации действующих контуров управления, когнитивный модуль высокопроизводительного кластера с функциями искусственного интеллекта подключается параллельно – как дополнительный источник аналитических обзоров и достоверных сведений, работающий с теми же входными данными от распределенных радиолокационных станций, что и основные автоматизированные рабочие места ситуационного центра.

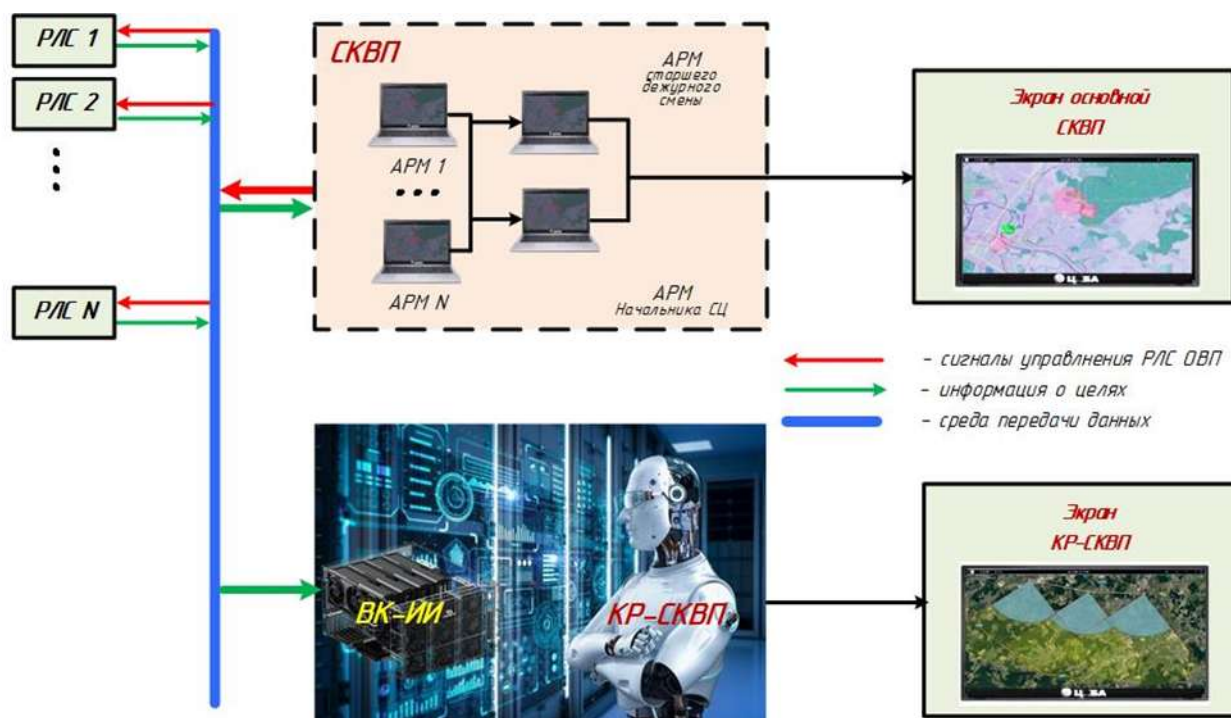


Рисунок 2. Интеграция высокопроизводительного кластера с функциями искусственного интеллекта и когнитивной системы контроля воздушного пространства в ситуационном центре

Это архитектурное решение позволяет высокопроизводительному кластеру с функциями искусственного интеллекта:

- получать, сохранять и анализировать потоки радиолокационной информации в реальном времени без вмешательства в критически важные цепочки управления и отображения ситуационного центра;
- адаптироваться к типовой структуре системы контроля воздушного пространства и минимизировать требования к существующей инфраструктуре;
- постепенно накапливать массивы исторических и текущих данных, необходимые для обучения моделей искусственного интеллекта и повышения их прогностической точности;
- выдавать операторам ситуационного центра рекомендации, основанные на глубоком анализе ситуации, выявлении скрытых взаимосвязей и автоматическом прогнозировании развития событий.

Таким образом, интеллектуальный модуль становится когнитивным усилителем для традиционной системы, действуя как высокоточный «второй контур интерпретации». Он не заменяет, а усиливает и дополняет систему контроля воздушного пространства, повышая ее устойчивость, адаптивность и эффективность принятия решений в условиях перегрузки или неопределенности.

Подобная интеграция особенно актуальна в условиях постоянного роста сложности воздушной обстановки, когда ни одна из изолированных подсистем – будь то человек-оператор, радиолокационная станция или автоматизированное рабочее место – не способна обеспечить своевременный и полный охват всех

аспектов ситуации. Высокопроизводительный кластер с функциями искусственного интеллекта берет на себя когнитивную нагрузку: он непрерывно обучается, уточняет вероятности, формирует приоритеты и помогает операторам сосредоточиться на ключевых решениях.

Внедрение вычислительного кластера с функциями искусственного интеллекта по параллельной модели обеспечивает устойчивый путь к когнитивной трансформации системы контроля воздушного пространства в когнитивную распределенную систему контроля воздушного пространства, позволяя развивать интеллектуальные функции без риска сбоев и с полной совместимостью с текущими структурами управления.

Вычислительная инфраструктура высокопроизводительного кластера с функциями искусственного интеллекта

Выбор архитектуры высокопроизводительной вычислительной платформы определяется задачами анализа радиолокационной информации в реальном времени, возможностью масштабирования и надежностью. Возможны несколько альтернативных вариантов построения такой инфраструктуры, каждый из которых имеет свои особенности и должен рассматриваться при формировании технического задания на модернизацию системы контроля воздушного пространства.

Вариант 1. GPU-кластер для централизованной обработки

Описание: вычислительный кластер на базе серверов с графическими ускорителями (NVIDIA A100, H100 и др.) с фокусом на централизованную обработку больших массивов данных.

Преимущества: высокая производительность, зрелая экосистема программного обеспечения, масштабируемость.

Недостатки: высокое энергопотребление, требования к охлаждению, возможные задержки при передаче данных от удаленных радиолокационных станций.

Рекомендуется, если приоритет отдается точности, глубокой аналитике и наличию надежной сетевой инфраструктуры.

Вариант 2. Гибридная архитектура с ARM/FPGA модулями на периферии

Описание: децентрализованная архитектура с распределенной предобработкой сигналов на периферийных узлах (например, ZynqUltraScale+), с передачей обработанных данных в центр.

Преимущества: низкая задержка, снижение сетевой нагрузки, устойчивость к сбоям.

Недостатки: повышенная сложность в синхронизации и обновлении программного обеспечения.

Рекомендуется, если важна автономность и отказоустойчивость отдельных узлов системы.

Вариант 3. Контейнеризованная облачная архитектура

Описание: использование Kubernetes-кластера (набор компьютеров, которые запускают контейнеризированные приложения) на локальных или распределенных ресурсах.

Преимущества: гибкость в управлении, быстрая масштабируемость, объединение команд разработки и эксплуатации.

Недостатки: требования к информационно-технологической инфраструктуре, необходимость внедрения методологии разработки программного обеспечения, направленной на автоматизацию процессов сборки, тестирования и развертывания.

Рекомендуется, если модернизация предполагает долгосрочное развитие и интеграцию с другими цифровыми платформами.

Критерии выбора архитектуры для технического задания на модернизацию системы контроля воздушного пространства:

- тип и плотность радиолокационных источников в регионе;
- пропускная способность и надежность сетевой инфраструктуры;
- уровень доступного энергоснабжения и охлаждения;
- квалификация обслуживающего персонала и возможности для технической поддержки;
- необходимость обработки первичной и вторичной радиолокационной информации;
- финансовые и временные рамки проекта модернизации.

Таким образом, выбор архитектуры высокопроизводительного кластера с функциями искусственного интеллекта должен быть обоснован в техническом задании в зависимости от задач, масштабов, ресурсов и возможностей интеграции с существующей системой контроля воздушного пространства ситуационного центра.

Функции когнитивной обработки и адаптации

Ключевым элементом новой парадигмы радиолокационного мониторинга становится применение искусственного интеллекта для когнитивной обработки радиолокационной информации. Благодаря возможностям современных моделей машинного обучения и предиктивной аналитики, система с искусственным интеллектом и высокопроизводительным кластером приобретает свойства, выходящие за пределы классической автоматизации: обучаемость, контекстуальность, предвидение и способность к самооптимизации.

Платформа высокопроизводительного кластера с функциями искусственного интеллекта выполняет не просто фильтрацию или предварительный анализ сигналов, а реализует многоуровневую обработку, включающую:

- формирование и постоянное обновление трехмерной модели радиолокационного поля с учетом рельефа местности, урбанизации и динамических помех;
- выявление паттернов в траекториях и поведении воздушных объектов (включая БПЛА, метеоявления, фрагменты отражений от зданий и биообъектов);
- обнаружение аномалий и событий, нехарактерных для конкретного региона или времени суток;
- генерацию прогнозов развития обстановки на основании обученных временных и пространственно-динамических моделей;
- формирование рекомендаций по изменению режимов работы радиолокационных станций, включая адаптивное распределение частот, направлений обзора и плотности зондирования;
- выдачу решений в формате ситуационного резюме с приоритетной маркировкой угроз и отображением наиболее вероятных сценариев развития событий.

Преимуществом когнитивной обработки является учет локального контекста – система обучается на реальных исторических и текущих данных конкретного региона. [6, 7]. Это позволяет формировать уникальную, «регионально специализированную» модель воздушной обстановки, адаптированную под географию, климат, помеховую обстановку и характер типичных угроз.

Кроме того, модули с искусственным интеллектом способны автоматически адаптироваться к изменениям входных условий – например, к смене радиолокационного парка, добавлению новых источников радиолокационной информации или изменению протоколов передачи. Это позволяет сохранять высокую эффективность системы даже при развертывании в условиях ограниченного контроля или при динамическом росте числа сенсоров.

Таким образом, технологии искусственного интеллекта в рамках высокопроизводительного кластера с функциями машинного обучения не являются вспомогательным инструментом, а выступают ядром когнитивной радиолокационной экосистемы, обеспечивая интеллектуальный уровень анализа, необходимый для противодействия современным и будущим воздушным угрозам.

Перспективы мультисенсорной интеграции в мониторинге воздушной обстановки

Одним из ключевых направлений развития когнитивных систем контроля воздушного пространства является расширение спектра используемых источников данных за пределы радиолокационной информации (рисунок 3).

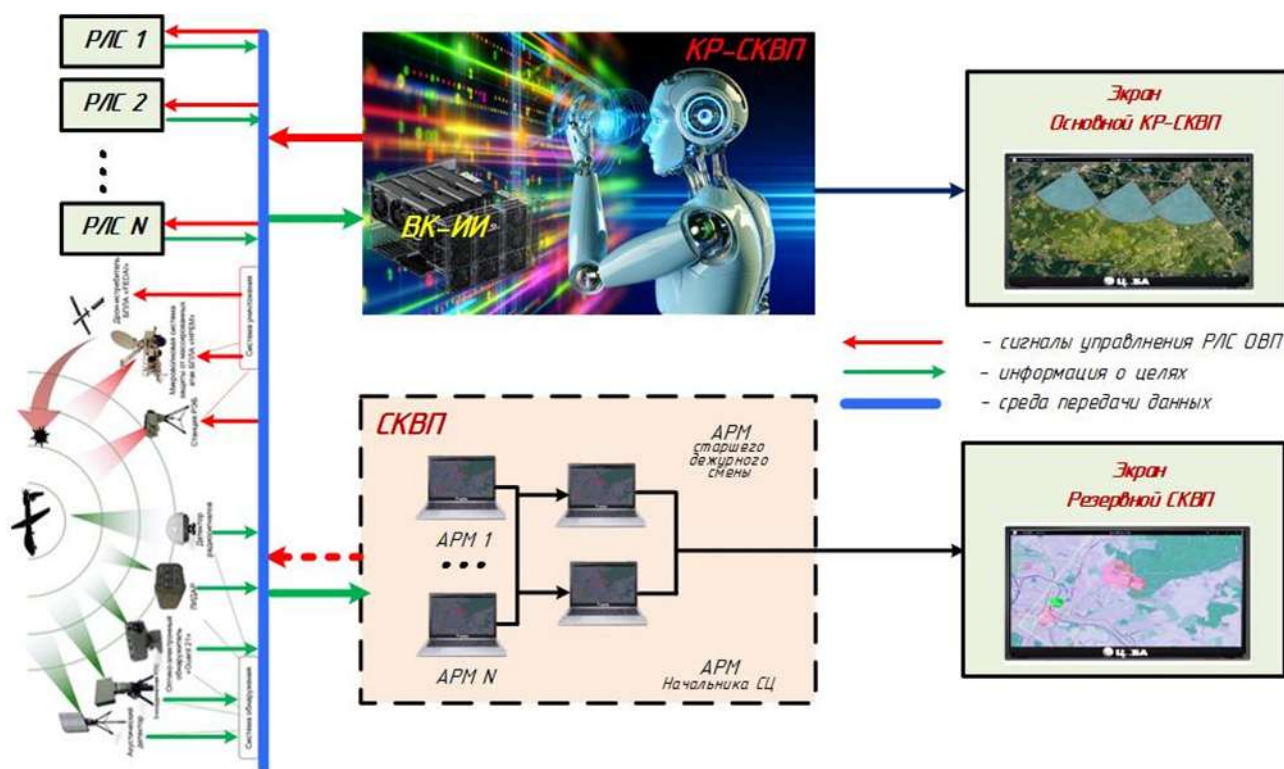


Рисунок 3. Мультисенсорная интеграция в когнитивную распределенную систему контроля воздушного пространства [8]

Мультисенсорная интеграция позволяет существенно повысить достоверность, полноту и устойчивость анализа воздушной обстановки за счет объединения разнородных информационных каналов в единую когнитивную модель восприятия.

Наиболее перспективными направлениями интеграции являются [6]:

- оптические и инфракрасные системы (ИК): позволяют распознавать объекты при плохих метеоусловиях или в условиях слабых радиолокационных отражений. ИК-камеры обеспечивают идентификацию тепловых сигнатур и малозаметных целей;

- системы видеонаблюдения высокого разрешения: визуальное подтверждение типа цели, оценка ее поведения, анализ траектории с помощью видеотрекинга. В сочетании с искусственным интеллектом возможна автоматическая классификация объектов;

- сенсоры радиопеленгации и радиотехнической разведки: дают возможность локализовать источники радиоизлучения и соотносить их с радиолокационными и визуальными наблюдениями. Особенно актуальны для выявления активных БПЛА или средств радиосвязи противника;

- системы радиоэлектронной борьбы: при правильной интеграции могут не только подавлять, но и маркировать активные сигналы, повышая информативность данных по вражеской активности и обеспечивая синергетический эффект с радиолокационными станциями и аналитикой искусственного интеллекта;

- акустические и сейсмические сенсоры: особенно эффективны в маловысотных зонах и при обнаружении низкоскоростных объектов;
- метеодатчики и атмосферные профили: позволяют искусственному интеллекту учитывать текущее состояние среды распространения волн и тем самым улучшать точность прогноза обнаружения и локализации объектов.

Высокопроизводительный кластер с функциями искусственного интеллекта функционирует как интеграционный хаб, преобразующий и согласовывающий данные от различных источников в общую информационную картину. Благодаря этому реализуется принцип ситуативного интеллекта — системы, способной не только фиксировать, но и интерпретировать события, адаптируясь к сложной, динамически изменяющейся обстановке.

В перспективе мультисенсорная архитектура позволит:

- повысить устойчивость системы к помехам и отказам отдельных сенсоров;
- расширить спектр детектируемых угроз (в том числе пассивных и скрытых);
- использовать гибридные методы обработки данных (радарные + визуальные + спектральные);
- создавать распределенные узлы наблюдения на базе мобильных и стационарных платформ.

Таким образом, переход от радиолокационного мониторинга к интегрированной мультисенсорной среде восприятия открывает новые горизонты в автоматизации и интеллектуализации систем контроля воздушного пространства. Он превращает когнитивную распределенную систему контроля воздушного пространства в гибкую, адаптивную, масштабируемую экосистему, способную оперативно реагировать на угрозы любого типа в режиме реального времени.

Этапы эволюции системы контроля воздушного пространства: от классики к когнитивной архитектуре

Развитие систем контроля воздушного пространства с применением вычислительных кластеров с функциями искусственного интеллекта предполагает не одномоментную замену действующих средств, а пошаговую эволюцию, интегрирующую новые технологии с минимальными рисками для непрерывной работы. Такой подход обеспечивает управляемость перехода, адаптацию персонала и возможность проверки эффективности новых решений в реальных условиях [4, 9].

Этап 1. Цифровизация и стандартизация данных от радиолокационных станций

1.1. Обеспечение стабильной и формализованной передачи радиолокационной информации от радиолокационных станций в цифровом виде.

1.2. Внедрение промежуточных шлюзов и адаптеров протоколов для интеграции с высокопроизводительным кластером с функциями искусственного интеллекта.

1.3. Архивирование и маркировка данных для последующего обучения искусственного интеллекта.

Этап 2. Параллельное, бесстрессовое внедрение высокопроизводительного кластера с функциями искусственного интеллекта

2.1. Развертывание вычислительного кластера на базе существующей информационно-технологической инфраструктуры ситуационного центра.

2.2. Подключение к потокам радиолокационной информации и запуск аналитических модулей искусственного интеллекта в тестовом режиме без влияния на основной контур управления.

2.3. Обучение нейросетевых моделей на архивных и оперативных данных.

Этап 3. Частичная когнитивная автоматизация процессов наблюдения

3.1. Внедрение автоматического выделения и классификации аномалий в радиолокационной информации.

3.2. Выдача рекомендаций оператору без права на изменение режимов работы оборудования.

3.3. Мониторинг точности и скорости реагирования модулей искусственного интеллекта.

Этап 4. Расширение когнитивных функций и автономного анализа

4.1. Использование искусственного интеллекта для построения прогнозов воздушной обстановки и раннего оповещения.

4.2. Адаптивное изменение режимов обзора и зондирования радиолокационных станций по командам от модулей искусственного интеллекта.

4.3. Интеграция с другими сенсорными системами.

Этап 5. Переход к распределенной когнитивной системе контроля воздушного пространства

5.1. Объединение нескольких ситуационных центров в общую сеть с распределенной обработкой, используя опыт внедрения искусственного интеллекта в региональных центрах.

5.2. Автоматическое перераспределение вычислительных и сенсорных ресурсов в зависимости от нагрузки и угроз.

5.3. Формирование ситуационного интеллекта на уровне страны или региона.

Преимуществом такого подхода является сохранение управляемости модернизации и плавная трансформация системы контроля воздушного пространства в когнитивную систему нового поколения, способную не только отображать, но и осмысленно интерпретировать и предсказывать развитие воздушной обстановки.

Каждый из этапов должен сопровождаться:

- оценкой прироста функциональности и достоверности;
- обратной связью от операторов ситуационных центров;

- подготовкой нормативной базы и инструкций;
- расчетом затрат и оценки рисков внедрения.

Таким образом, эволюционная траектория позволяет перейти от классической архитектуры системы контроля воздушного пространства к когнитивной экосистеме с минимальными организационно-техническими барьерами и максимальным приростом эффективности.

Будущее когнитивной РЛС-сети и стратегические перспективы

На финальном этапе эволюции системы контроля воздушного пространства когнитивные модули с искусственным интеллектом и мультисенсорные кластеры формируют основу распределенной интеллектуальной радиолокационной сети нового поколения. Это не просто модернизированная система наблюдения, а фундамент для построения устойчивой, самообучающейся экосистемы, адаптирующейся к внешним условиям и угрозам в режиме реального времени.

Выделяют следующие ключевые направления развития [5, 7, 10, 11].

- Единая национальная когнитивная платформа систем контроля воздушного пространства: объединение региональных центров в общую информационно-аналитическую систему, способную обмениваться моделями, данными и ситуационным контекстом для повышения общей устойчивости и точности прогнозирования.

- Интеграция с гражданскими платформами: когнитивные распределенные системы контроля воздушного пространства могут быть полезны для задач гражданской авиации, экологического мониторинга, стихийных бедствий и безопасности воздушного движения.

- Слияние искусственного интеллекта и цифровых двойников: развитие виртуальных моделей воздушной обстановки на основе цифровых двойников регионов позволит проводить сценарный анализ и опробовать реакции системы без риска вмешательства в реальную инфраструктуру.

- Адаптация под угрозы следующего поколения: когнитивная архитектура готова к расширению – например, к интеграции спутниковых данных, квантовых сенсоров или нейросетей с самонастройкой.

- Межведомственное и транснациональное взаимодействие: платформа, построенная на открытых протоколах и модульной архитектуре, может стать технологической основой для межведомственного обмена информацией, координации в чрезвычайных ситуациях и будущих международных программ коллективной воздушной безопасности.

Заключение

Переход от традиционной архитектуры системы контроля воздушного пространства к когнитивной – это не просто внедрение новых технологий, а системная трансформация принципов работы, мышления и взаимодействия человека и машины в контексте безопасности воздушного пространства.

Высокопроизводительные кластеры с функциями искусственного интеллекта, мультисенсорная интеграция, адаптивные алгоритмы и возможности самообучения формируют интеллектуальную платформу, способную обеспечить превентивный, устойчивый и осмысленный мониторинг воздушной среды.

Такой подход открывает путь к созданию многоуровневой цифровой оборонной инфраструктуры, в которой каждый компонент – от радиолокационной станции до модуля искусственного интеллекта – работает согласованно, прогнозирует угрозы и своевременно предоставляет обоснованные рекомендации операторам и системам автоматического реагирования.

Будущее распределенной системы контроля воздушного пространства – это когнитивная система, способная не просто видеть, а понимать, не просто фиксировать, а предугадывать. И ее развитие уже началось.

Список литературы

1. Gurbuz S. Z., Griffiths H. D., Charlish A., Rangaswamy M., Greco M. S., Bell K. An overview of cognitive radar: past, present, and future // IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. 2019. 34 (12). 6–18. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8961364> (Дата обращения: 20.06.2025).
2. Татузов А. Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. Книга 28. Москва: Радиотехника, 2009. 432 с. (Научная серия «Нейрокомпьютеры и их применение»).
3. Пальгуев Д. А., Фитасов Е. С., Ильясафов А. Д. Система распознавания малоразмерных малоскоростных воздушных объектов по объединенной разнородной информации и неполным данным от пространственно-разнесенных датчиков // Датчики и системы. 2023. 1 (266). 16–22. DOI: 10.25728/datsys.2023.1.3
4. Cognitive radar. Final report of task group SET-227. NATO. URL: [https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/STO-TR-SET-227/\\$\\$TR-SET-227-ALL.pdf](https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/STO-TR-SET-227/$$TR-SET-227-ALL.pdf) (Дата обращения: 20.06.2025).
5. Thaens R. Cognitive sensors in the intelligence cycle // NATO CI Agency. STO Meeting Proceedings. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-SET-311/MP-SET-311-MSS-109.pdf> (Дата обращения: 20.06.2025).
6. Handbook of multisensor data fusion: theory and practice / Eds. Liggins II M., Hall D., Llinas J. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 870 p. DOI: 10.1201/9781420053098
7. Кобан А. Я., Самотонин Д. Н. Научно-технические проблемы развития федеральной системы разведки и контроля воздушного пространства Российской Федерации и пути их решения // Военная мысль. 2017. 4. 14–18.
8. Глахтеев С. В. Система противодействия беспилотным летательным аппаратам с оптико-электронным типом наведения // Молодой ученый:

международный научный журнал. 2024. 36 (535). 8–15.
URL: <https://moluch.ru/archive/535/> (Дата обращения: 20.06.2025)

9. Бендерский Г. П. 25 лет Федеральной системе разведки и контроля воздушного пространства Российской Федерации: этапы становления и развития // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019. 1 (28). 6–12.

10. Созыкин А. Г. Состояние и направления развития Федеральной системы разведки и контроля воздушного пространства Российской Федерации // Военная мысль. 2021. 2. 78–90.

11. Haykin S. Cognitive dynamic systems: perception-action cycle, radar and radio. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 394 p.

References

1. Gurbuz S. Z., Griffiths H. D., Charlish A., Rangaswamy M., Greco M. S., Bell K. An overview of cognitive radar: past, present, and future // IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. 2019. 34 (12). 6–18. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8961364> (Accessed: 20.06.2025).

2. Tatuzov A. L. Neural Networks in Radar Problems. Book 28. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2009. 432 p. (Scientific Series “Neurocomputers and Their Applications”). (In Russian).

3. Palguev D. A., Fitasov E. S., Ilyasafov A. D. Recognition system for small low-speed aerial objects using combined heterogeneous information and incomplete data from spatially distributed sensors // Sensors and systems. 2023. 1 (266). 16–22. DOI: 10.25728/datsys.2023.1.3 (In Russian).

4. Cognitive radar. Final report of task group SET-227. NATO. URL: [https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/STO-TR-SET-227/\\$\\$TR-SET-227-ALL.pdf](https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/STO-TR-SET-227/$$TR-SET-227-ALL.pdf) (Accessed: 20.06.2025).

5. Thaens R. Cognitive sensors in the intelligence cycle // NATO CI Agency. STO Meeting Proceedings. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-SET-311/MP-SET-311-MSS-109.pdf> (Accessed: 20.06.2025).

6. Handbook of multisensor data fusion: theory and practice / Eds. Liggins II M., Hall D., Llinas J. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 870 p. DOI: 10.1201/9781420053098

7. Koban A. Ya., Samotonin D. N. Scientific-technical problems touching development of the rf federal system of air space reconnaissance and control and ways of their solution // Military thought. 2017. 4. 14–18. (In Russian).

8. Glakhteev, S. V. Counteraction system against unmanned aerial vehicles with optoelectronic guidance // Young scientist: international scientific journal. 2024. 36 (535). 8–15. URL: <https://moluch.ru/archive/535/> (Accessed: 20.06.2025). (In Russian).

9. Bendersky, G. P. Federal system of inspection and control of the air space of the Russian Federation 25 years. Results and prospects of development // Bulletin of Concern VKO “Almaz – Antey”. 2019. 1 (28). 6–12. (In Russian).

10. Sozykin, A. G. Status and development directions of the Federal System of Reconnaissance and Control of the Airspace of the Russian Federation // Military thought. 2021. 2. 78–90. (In Russian).

11. Haykin S. Cognitive dynamic systems: perception-action cycle, radar and radio. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 394 p.

Информация об авторах

Хомяков Александр Викторович – доктор технических наук, генеральный директор, Центральное конструкторское бюро аппаратостроения (Тула, Россия), ORCID: 0009-0008-9164-1538, cdbae@cdbae.ru

Логвинов Сергей Сергеевич – доктор технических наук, главный инженер, Центральное конструкторское бюро аппаратостроения (Тула, Россия), ORCID: 0009-0008-0866-0480, logvinov@cdbae.ru

Хомяков Кирилл Александрович – кандидат технических наук, начальник отделения, Центральное конструкторское бюро аппаратостроения (Тула, Россия), ORCID: 0009-0000-7456-9951, cdbae@cdbae.ru

Лазин Юрий Алексеевич – начальник отдела, Центральное конструкторское бюро аппаратостроения (Тула, Россия), ORCID: 0009-0009-5517-3754, yury.lazin@ckba-tula.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 669.713:620.197

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).484-494

Поступила в редакцию / Received 02.09.2025

ГРНТИ 53.37.29+53.01.97

Специальность ВАК 1.3.8.; 2.6.17.

Принята к публикации / Accepted 28.10.2025

Научная статья

АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ С КРЕМНИЕМ В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

Бексеитова Г. К.¹, Ганиев И. Н.², Сафаров А. Г.¹

¹ *Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана
(Душанбе, Республика Таджикистан)*

² *Институт химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана
(Душанбе, Республика Таджикистан)*

Аннотация. Электрохимические и коррозионные характеристики алюминиевого сплава, модифицированного кремнием, были исследованы в среде NaCl с использованием потенциостатического метода в потенциодинамическом режиме. Скорость изменения потенциала при развертке составляла 2 мВ/с. Полученные зависимости свободного коррозионного потенциала от времени для исходного алюминия и кремнийсодержащих сплавов демонстрируют его смещение в сторону более положительных значений, что свидетельствует о повышении устойчивости материала к коррозии. Установлено, что увеличение содержания кремния в сплаве приводит к положительному сдвигу потенциалов свободной коррозии, репассивации и начала питтингового разрушения. В то же время повышение концентрации хлорид-ионов в растворе NaCl вызывает обратный эффект – электрохимический потенциал алюминиевых сплавов с кремнием смещается в отрицательную область. Это сопровождается ростом скорости коррозионных процессов вне зависимости от состава сплава, что подтверждает агрессивное воздействие хлоридов на алюминиевые материалы. Добавление кремния в различных концентрациях способствует увеличению коррозионной стойкости алюминиевого сплава марки А6, обеспечивая улучшение на 8–10% по сравнению с исходным материалом.

Ключевые слова: сплав алюминия А6, кремний, потенциостатический метод, электролит NaCl, потенциал коррозии, потенциал питтингообразования, скорость коррозии

Для цитирования: Бексеитова Г. К., Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Нуров Н. Р. Анодное поведение сплавов алюминия с кремнием в среде электролита NaCl // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 484–494. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).484-494

Research Article

ANODIC BEHAVIOR OF ALUMINUM-SILICON ALLOYS IN NaCl ELECTROLYTE ENVIRONMENT

Bekseitova G. K.¹, Ganiev I. N.², Safarov A. G.¹

¹ *S. U. Umarov Physical–Technical Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan
(Dushanbe, Republic of Tajikistan)*

² *V. I. Nikitin Chemistry Institute of the Tajikistan Academy of Sciences (Dushanbe, Republic of Tajikistan)*

Abstract. The electrochemical and corrosion characteristics of silicon-modified aluminum alloy were investigated in a NaCl environment using a potentiostatic method in a potentiodynamic regime. The rate of potential change during the sweep was 2 mV/s. The obtained dependences of the free corrosion potential on time for the initial aluminum and silicon-containing alloys demonstrate its shift towards more positive values, which indicates an increase in the material's resistance to corrosion. It has been established that an increase in the silicon content in the alloy leads to a positive shift in the potentials of free corrosion,

repassivation, and the onset of pitting failure. At the same time, an increase in the concentration of chloride ions in the NaCl solution causes the opposite effect – the electrochemical potential of aluminum alloys with silicon shifts to the negative region. This is accompanied by an increase in the rate of corrosion processes, regardless of the alloy composition, which confirms the aggressive effect of chlorides on aluminum materials. The addition of silicon in various concentrations increases the corrosion resistance of A6 grade aluminum alloy, providing an improvement of 8-10% compared to the starting material.

Keywords: *aluminum alloy A6, silicon, potentiostatic method, NaCl electrolyte, corrosion potential, pitting potential, corrosion rate*

For citation: Bekseitova G. K., Ganiev I. N., Safarov A. G., Nurov N. R. Anodic behavior of aluminum-silicon alloys in NaCl electrolyte environment // Vestnik NovSU. 3 (141). 484–494. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).484-494

Введение

В настоящее время существенно возрастает интерес к проблемам повышения коррозионной стойкости конструкционных металлических сплавов, особенно в условиях эксплуатации в агрессивных средах. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью увеличения срока службы материалов и повышения надежности конструктивных элементов, используемых в строительстве, машиностроении, авиационной и транспортной промышленности [1, с. 21–24; 2, 3].

Алюминиевые сплавы находят широкое применение в различных отраслях техники благодаря высокому соотношению прочности к массе, хорошей технологичности и коррозионной стойкости. Особенно востребованы они в авиационной промышленности, где предъявляются высокие требования к легкости и надежности конструкционных материалов. Алюминиевые сплавы применяются при изготовлении силовых элементов планера, обшивки, крепежных деталей и других конструктивных компонентов летательных аппаратов. Однако их эксплуатация в условиях повышенной влажности, соляных аэрозолей и других агрессивных факторов требует обеспечения достаточной устойчивости к коррозионному разрушению [4, 5].

Особый интерес представляют литейные сплавы системы алюминий-кремний (силумины), которые используются в производстве фасонных отливок, применяемых в автомобильной, тракторной, авиационной и строительной отраслях. Наилучшими литейными свойствами обладают сплавы Al-Si, в эвтектическом составе которых содержатся кристаллы почти чистого кремния и твердый раствор алюминия. При увеличении содержания кремния наблюдается повышение прочности, однако снижается пластичность материала. Химический состав и свойства алюминиевых литейных сплавов регламентированы стандартами, в том числе ГОСТ 1583-93 [6, 7].

Изучение анодного поведения алюминиево-кремниевых сплавов в различных электролитах представляет научный и практический интерес с точки зрения оценки их коррозионной стойкости и разработки мероприятий по ее повышению.

Цель настоящего исследования направлена на всестороннее изучение анодных характеристик алюминиевого сплава, модифицированного кремнием, в условиях

воздействия электролитической среды на основе хлорида натрия (NaCl) с различным уровнем концентрации. Основное внимание уделяется анализу влияния содержания кремния и концентрации хлорид-ионов на электрохимическое поведение материала.

Экспериментальная часть

Бинарные алюминиево-кремниевые сплавы получали легированием алюминия марки А6 металлическим кремнием КРО. Процесс осуществлялся в лабораторных шахтных печах сопротивления типа СШОЛ при температурном диапазоне 800–950°С. Концентрация кремния в исходных составах варьировалась от 0,5 до 1,5 мас.%. Из расплавов были сформированы цилиндрические образцы диаметром 8 мм и длиной 140 мм, отлитые в графитовые формы, предназначенные для последующего электрохимического анализа.

Химический состав полученных сплавов определялся в Центральной лаборатории ГУП «TALCO» с применением стандартных методов анализа компонентов. Для изучения электрохимических характеристик использовался потенциостатический метод, подробно описанный в литературе [8–10]. Испытания проводились в потенциодинамическом режиме на приборе ПИ-50-1.1 с постоянной скоростью развертки потенциала 2 мВ/с. В качестве среды использовался водный раствор NaCl. Сравнительным электродом служил хлорид-серебряный, а вспомогательным – платиновый.

Особое внимание в эксперименте уделялось подготовке поверхности образцов, поскольку она оказывает значительное влияние на точность измерения потенциала. Применялись два метода обработки:

- механическая подготовка включала последовательную шлифовку поверхности наждачной бумагой от крупнозернистой к мелкозернистой (№ 2 до № 00), промывку дистиллированной водой, полировку на влажной фильтровальной бумаге и последующую сушку на воздухе;
- химическая обработка проводилась после механической подготовки и включала обезжиривание поверхности в 10% растворе серной кислоты (H_2SO_4) в течение одной минуты, а затем катодную поляризацию при плотности тока 2 мА/см² в течение 20 минут, что обеспечивало эффективное удаление оксидной пленки с поверхности электрода.

Установлено, что спустя определенный временной интервал свободный коррозионный потенциал (также называемый потенциалом самопроизвольного тока) стабилизируется и достигает устойчивого значения, вне зависимости от способа предварительной обработки поверхности электрода.

В дальнейшем для проведения электрохимических испытаний была выбрана механическая подготовка поверхности как основной метод. Одновременно осуществлялась регистрация потенциодинамических кривых, а также проводилась

катодная поляризация, направленная на удаление оксидных слоев с поверхности металла. Коррозионные диаграммы, отражающие поляризационные процессы, должны учитывать не только активные стадии разрушения, но и изменения, происходящие в условиях формирования защитных пассивных пленок.

В связи с этим была разработана и применена подробная методика регистрации поляризационных кривых алюминиевого сплава марки А6 в 3% водном растворе NaCl (рисунок 1). При отсутствии внешнего тока поляризации металл находится в состоянии равновесия, соответствующем свободному коррозионному потенциалу $E_{ср.кор.}$ (рисунок 1, кривая I), который характеризует область активного растворения материала.

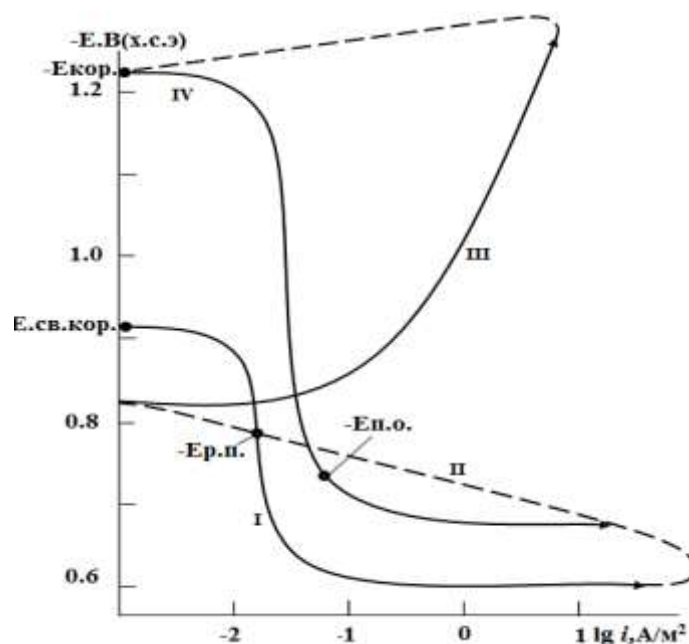


Рисунок 1. Кривая коррозионного поведения сплава алюминия марки А6 в растворе NaCl (3%) при скорости сканирования 2 мВ/с

По мере увеличения плотности тока наблюдается смещение стационарного потенциала в положительную сторону, что соответствует переходу металла в пассивное состояние, при котором скорость растворения существенно снижается. Далее образцы подвергались поляризации в отрицательном направлении (рисунок 1, кривые II и III) до потенциала (-1250) В, что обеспечивало разрушение оксидной пленки и активацию поверхности. После этого проводилась повторная поляризация в положительном направлении, в результате чего были получены анодные поляризационные кривые (рисунок 1, кривая IV).

Все четыре потенциодинамические кривые были зарегистрированы в одинаковых условиях – в 3% растворе хлорида натрия, что позволило объективно оценить электрохимическое поведение алюминиевого сплава при различных стадиях коррозионного процесса.

В ходе регистрации полной поляризационной кривой были определены ключевые электрохимические параметры, характеризующие коррозионную активность алюминиево-кремниевых сплавов:

- Ест. или Есв.кор. – свободный коррозионный потенциал, отражающий начальное состояние поверхности;
- Ер.п. – потенциал репассивации, указывающий на способность материала восстанавливать защитные свойства;
- Еп.о. – потенциал начала питтинговой коррозии, свидетельствующий о переходе к локализованному разрушению;
- Екор. – коррозионный потенциал, определяющий термодинамическую склонность к окислению;
- $i_{р.п.}$ – плотность коррозионного тока, отражающая интенсивность электрохимического процесса.

Снижение скорости коррозии в исследуемых условиях обусловлено ослаблением катодной реакции, которая в нейтральной среде контролируется процессом восстановления кислорода. Расчет плотности коррозионного тока осуществлялся по катодной ветви потенциодинамической кривой с использованием Тафелевской константы, принятой равной 0,12 В. Скорость коррозии K вычислялась по формуле:

$$K = i_{кор} \cdot k,$$

где $k = 0,335 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$ – электрохимический эквивалент алюминия [10].

Эксперименты проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 9.905–2007 в 3% растворе NaCl, имитирующем морскую воду, с целью оценки влияния хлорид-ионов на электрохимическую устойчивость алюминия, легированного кремнием.

В таблицах 1 и 2, а также на рисунке 2 представлены основные электрохимические характеристики сплавов, определяющие их коррозионное поведение. Временные зависимости свободного коррозионного потенциала, полученные как в 3% растворе NaCl (таблица 1), так и в более разбавленных растворах – 0,03% и 0,3% NaCl (рисунок 2), демонстрируют устойчивое смещение потенциала в положительную сторону по мере увеличения времени, независимо от содержания кремния в сплаве.

Таблица 1. Изменение потенциала свободной коррозии (-Есв.кор., В) во времени для сплава Al–Si в среде NaCl (3%)

Время выдержки, минут	Содержания кремния в сплаве, мас. %				
	А6	0,5	0,8	1,0	1,5
0	1,012	1,006	0,994	0,979	0,973
0,15	1,002	0,995	0,983	0,970	0,966
0,2	0,991	0,984	0,972	0,964	0,955
0,3	0,982	0,974	0,963	0,956	0,945
0,4	0,973	0,965	0,954	0,949	0,936
0,5	0,965	0,956	0,946	0,942	0,926
0,6	0,952	0,948	0,938	0,934	0,917
2	0,946	0,940	0,931	0,925	0,909
3	0,940	0,933	0,924	0,917	0,902
4	0,935	0,926	0,917	0,910	0,896
5	0,933	0,920	0,911	0,902	0,890
10	0,929	0,914	0,905	0,895	0,884
20	0,925	0,909	0,900	0,890	0,879
30	0,922	0,905	0,896	0,886	0,875
40	0,919	0,902	0,893	0,883	0,873
50	0,917	0,901	0,891	0,882	0,871
60	0,916	0,901	0,890	0,882	0,870

Дополнительно установлено, что увеличение концентрации кремния способствует положительному сдвигу свободного коррозионного потенциала. Через 20–30 минут после начала испытаний потенциал стабилизируется и достигает постоянного значения, что подтверждается данными таблицы 1 и рисунка 2.

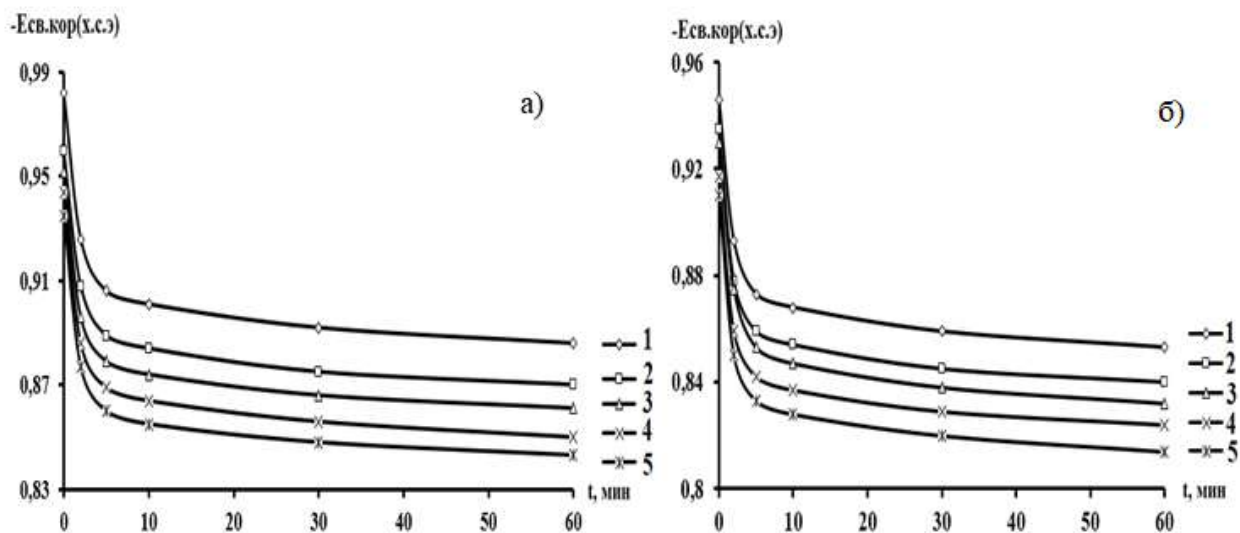


Рисунок 2. Потенциал свободной коррозии (-Есв.кор., В) алюминиевого сплава, легированного Si, в 0,03% (а) и 0,3% (б) NaCl

Таблица 2 содержит обобщенные результаты исследования коррозионно-электрохимического поведения алюминиевого сплава, легированного кремнием, в водных растворах NaCl с различной концентрацией. Измерения проводились при скорости развертки потенциала 2 мВ/с. Анализ данных показал, что увеличение содержания кремния в сплаве приводит к смещению потенциалов коррозии, репассивации и начала питтинговой коррозии в положительную область, что свидетельствует о повышении устойчивости материала к электрохимическому разрушению.

Таблица 2. Анализ коррозионно-электрохимических характеристик алюминиевого сплава Al–Si в водном растворе NaCl

Среда NaCl, мас. %	Содержание Si в сплаве, мас. %	Электрохимические потенциалы, В				Скорость коррозии	
		-E _{св.кор.}	-E _{кор.}	-E _{п.о.}	-E _{р.п.}	i _{кор.} , А/м ²	K · 10 ³ , г/м ² ·ч
0,03	-	0,853	1,098	0,597	0,717	5,3	17,7
	0,5	0,841	1,086	0,588	0,712	5,1	17,0
	0,8	0,832	1,071	0,576	0,706	4,9	16,4
	1,0	0,823	1,053	0,563	0,701	4,7	15,7
	1,5	0,813	1,038	0,550	0,697	4,5	15,0
0,3	-	0,886	1,171	0,676	0,765	7,1	23,7
	0,5	0,871	1,166	0,662	0,759	6,9	23,1
	0,8	0,860	1,150	0,651	0,752	6,7	22,4
	1,0	0,851	1,133	0,644	0,747	6,5	21,7
	1,5	0,843	1,121	0,638	0,740	6,3	21,1
3	-	0,916	1,233	0,731	0,793	8,6	28,8
	0,5	0,901	1,222	0,719	0,784	8,4	28,1
	0,8	0,890	1,213	0,710	0,775	8,2	27,4
	1,0	0,882	1,201	0,700	0,767	8,0	26,8
	1,5	0,870	1,193	0,694	0,763	7,8	26,1

Во всех трех исследованных концентрациях электролита (0,03%, 0,3% и 3% NaCl) добавление кремния в алюминий марки А6 до уровня 1,5 мас.% способствует снижению скорости коррозии на 8–10%, что подтверждается данными таблицы 2.

Анодные участки потенциодинамических кривых для алюминиево-кремниевых сплавов представлены на рисунке 3. Переход кривых в область положительных потенциалов указывает на снижение интенсивности анодного растворения, что отражает формирование пассивного состояния поверхности и усиление защитных свойств материала.

На рисунке 4 представлена температурная зависимость скорости коррозии алюминиево-кремниевых сплавов в водных растворах NaCl с концентрацией 0,03%, 0,3% и 3,0%.

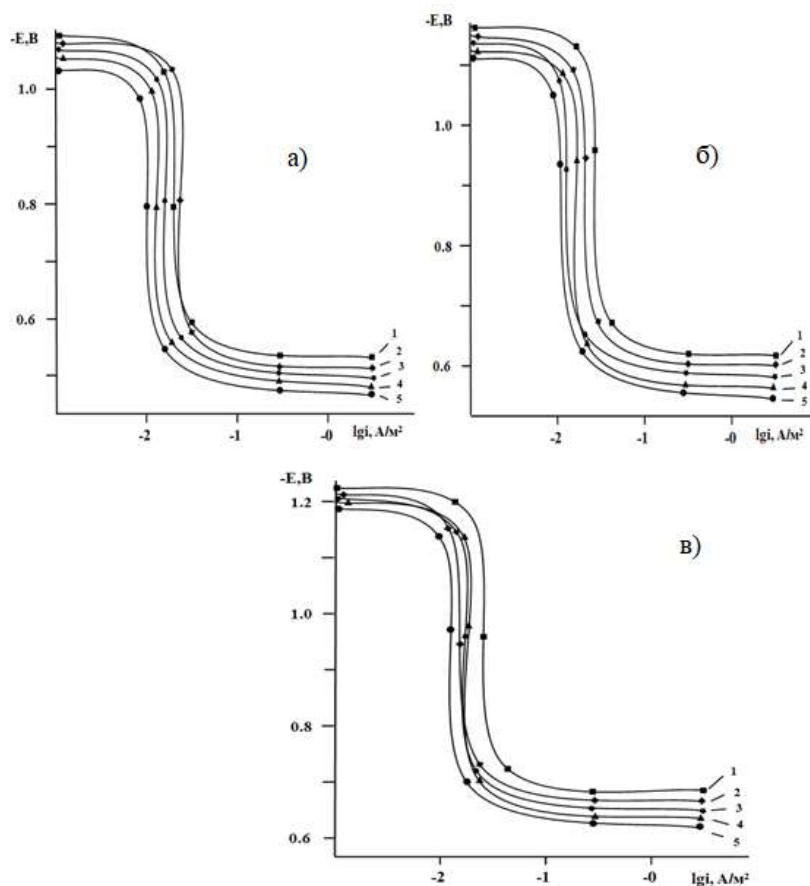


Рисунок 3. Расположение анодных поляризационных кривых (при развертке 2 мВ/с) алюминиевого сплава (1) с различными содержаниями Si (мас.%): 2 – 0,5; 3 – 0,8; 4 – 1,0; 5 – 1,5, в растворах NaCl: 0,03% (а), 0,3% (б), 3% (в)

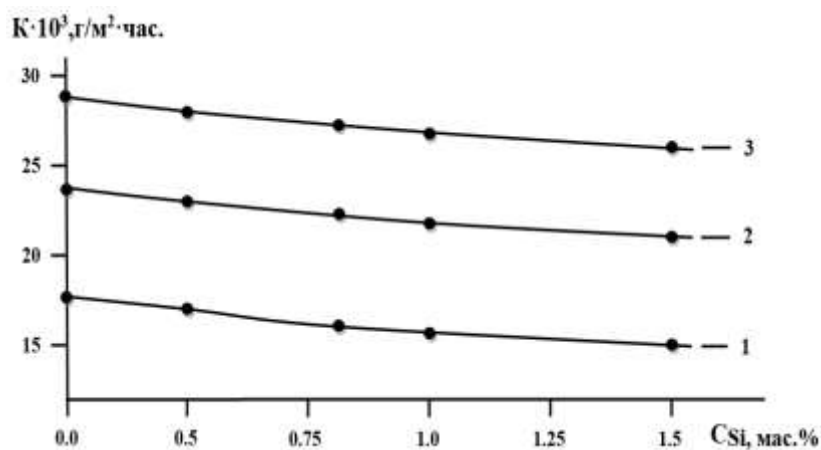


Рисунок 4. Влияние концентрации Si на скорость коррозии сплава Al в растворах NaCl различной концентрации: 1 – 0,03%, 2 – 0,3%, 3 – 3,0%

Полученные данные демонстрируют, что увеличение содержания хлорид-ионов в электролите приводит к усилению коррозионных процессов – этот эффект наглядно иллюстрируется на рисунке 5. Хлорид-ионная агрессия способствует ускоренному

разрушению поверхности сплавов, независимо от их состава. При этом наименьшие значения скорости коррозии и плотности коррозионного тока наблюдаются у образцов, содержащих 1,5 мас.% кремния. Это указывает на оптимальный уровень легирования, при котором достигается максимальная устойчивость алюминиевого сплава к электрохимическому воздействию в хлоридной среде.

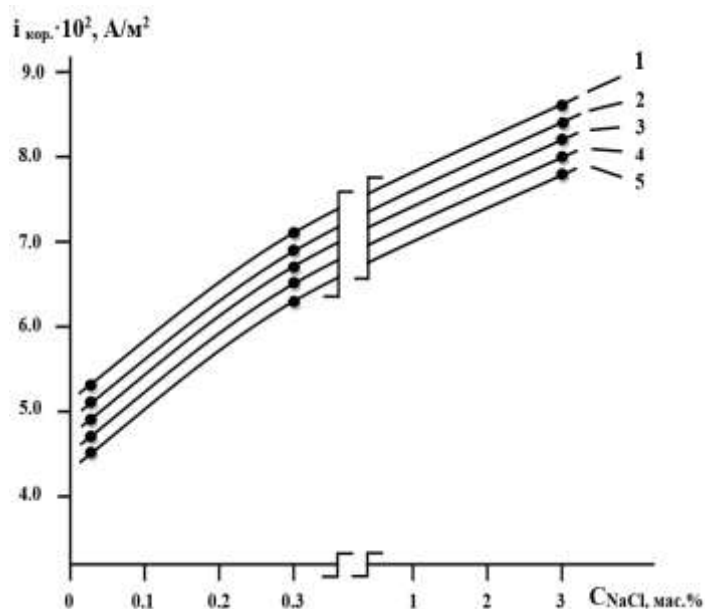


Рисунок 5. Влияние концентрации NaCl на плотность тока коррозии сплава Al–Si (1), при различных содержаниях Si (мас.%): 2 – 0,5; 3 – 0,8; 4 – 1,0; 5 – 1,5

Заключение

Проведенные исследования подтверждают, что легирование является одним из наиболее эффективных методов повышения коррозионной стойкости алюминиевых сплавов. Установлено, что добавление кремния к алюминию способствует формированию более устойчивой к коррозии структуры. Так, введение кремния в количестве нескольких процентов приводит к увеличению коррозионной стойкости сплава алюминия марки А6 на 8–10%.

При многократном увеличении концентрации хлорид-ионов в растворе NaCl – в 10 и 100 раз – наблюдается отчетливое смещение потенциала начала питтинговой коррозии в отрицательную область (таблица 2). Такое поведение сопровождается заметным ростом скорости анодного растворения. Для сплава, содержащего 1,5 мас.% кремния, скорость коррозии возрастает от 15 г/м²·ч в 0,03% растворе NaCl до 26,1 г/м²·ч при концентрации NaCl, увеличенной в 100 раз. Это подтверждает, что высокая концентрация хлорид-ионов существенно усиливает коррозионные процессы, преобладая над защитным эффектом легирования кремнием.

Таким образом, агрессивность среды оказывает значительное влияние на устойчивость алюминиево-кремниевых сплавов к коррозионному разрушению.

Полученные данные имеют практическую значимость при выборе материалов для конструктивных элементов, работающих в условиях повышенной влажности и соледержащей атмосферы. Особенно это актуально для авиационной промышленности, где эксплуатация изделий из алюминиевых сплавов осуществляется в условиях перепадов температур, высоких нагрузок и агрессивного атмосферного воздействия. Использование алюминий-кремниевых сплавов с оптимальным содержанием кремния позволяет повысить надежность и долговечность авиационных конструкций, снизить риски коррозионного разрушения и, как следствие, обеспечить безопасность и эффективность эксплуатации летательных аппаратов.

Список литературы

1. Коррозия и электрохимия цветных металлов и сплавов: тематический отраслевой сборник. Москва: Металлургия, 1982. 86 с.
2. Луц А. Р., Суслина А. А. Алюминий и его сплавы: учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. 81 с.
3. Альтман М. Б. Металлургия литейных алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия. 1977. 240 с.
4. Скорчеллетти В. В. Теоретические основы коррозии металлов. Ленинград: Химия. 1973. 263 с.
5. Колотыркин Я. М. Металл и коррозия. Москва: Металлургия. 1985. 88 с.
6. Никаноров С. П., Кардашев Б. К., Корчунов Б. Н., Осипов В. Н., Голяндин С. Н. Структура и физико-механические свойства Al-Si-сплавов // Журнал технической физики. 2010. 80 (4). 71–76.
7. Шепелевич В. Г., Гусакова О. В., Гусакова С. В. Влияние скорости охлаждения на структурно-фазовое состояние сплава Al-Si, легированного металлами // Физика и химия обработки материалов. 2023. 3. 63–71. DOI: 10.30791/0015-3214-2023-3-63-71
8. Ходжаназаров Х. М. Влияние щелочных металлов на коррозионно-электрохимическое поведение свинцовых баббитов Б(PbSb15Sn10) в среде раствора NaCl // Коррозия: защита, материалы. Приложение к журналу «Технология металлов». 2025. 14. 17–24. DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-14-17-24
9. Махмудзода М., Эшов Б. Б., Джайлоев Дж. Х. Анодное поведение алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃ в среде раствора электролита NaCl // Металлург. 2023. 10. 39–42.
10. Ганиев И. Н., Саидов М. М., Файзуллоев У. Н., Ходжаназаров Х. М. Анодное поведение алюминиевого сплава АМ4.5Мг1 типа дюралюмин, легированного празеодимом, в растворе NaCl // Практика противокоррозионной защиты. 2024. 29 (1). 37–45. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-4

References

1. Corrosion and electrochemistry of non-ferrous metals and alloys: a thematic industry collection. Moscow: Metallurgiya Publ., 1982. 86 p. (In Russian).
2. Lutz A. R., Suslina A. A. Aluminum and its alloys: a textbook. Samara: Samara State Technical University Publ., 2013. 81 p. (In Russian).

3. Altman M. B. Metallurgy of foundry aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya Publ., 1977. 240 p. (In Russian).
4. Scorcelletti V. V. Theoretical foundations of metal corrosion. Leningrad: Chemistry Publ., 1973. 263 p. (In Russian).
5. Kolotyркин Ya. M. Metal and corrosion. Moscow: Metallurgiya Publ., 1985. 88 p. (In Russian).
6. Nikanorov S. P., Kardashev B. K., Korchunov B. N., Osipov V. N., Golyandin S. N. Structure and physicomechanical properties of Al-Si alloys // Technical physics. 2010. 55 (4). 503–508.
7. Shepelevich V., Gusakova O., Husakova S. Effect of the melt cooling rate on the structural-phase state of the Al-Si alloy doped with metals // Fizika i khimiya obrabotki materialov. 2023. 3. 63–71. DOI: 10.30791/0015-3214-2023-3-63-71 (In Russian).
8. Khodzhanazarov Kh. M. Effect of alkali metals on corrosion-electrochemical behavior of lead babbitts b (PbSb15Sn10) in NaCl solution medium // Corrosion: protection, materials. Appendix to journal "Technology of metals". 2025. 14. 17–24. DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-14-17-24 (In Russian).
9. Mahmudzoda M., Eshov B. B., Jayloev Ja. H. Anode behavior of AK7 aluminum alloy and composite material of the Al-Al₂O₃ system in the medium of a NaCl electrolyte solution // Metallurg. 2023. 10. 39–42. (In Russian).
10. Ganiev I. N., Saidov M. M., Faizulloev U. N., Khojanazarov K. M. Anodic behavior of aluminum alloy AM4.5MG1 of the duralumin type, alloyed with praseodymium, in a NaCl solution // Theory and practice of corrosion protection. 2024. 29 (1). 37–45. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-4 (In Russian).

Сведения об авторах

Бексеитова Гульмира Копшиловна – соискатель, Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0009-0004-5926-3232, g.bekseitova@agakaz.kz

Ганиев Изатулло Наврузович – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0000-0002-2791-6508, ganievizatullo48@gmail.com

Сафаров Амиршо Гоибович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Физико-технический институт имени С. У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан), ORCID: 0009-0009-8517-3405, amirsho71@mail.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 577.11:577.112.3

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).495-505

Поступила в редакцию / Received 09.07.2025

ГРНТИ 31.27.51+31.27.41

Специальность ВАК 1.3.8.; 1.4.4.

Принята к публикации / Accepted 03.10.2025

Научная статья

ЛИЗИНАТ И МЕТИОНАТ ЦИНКА: СИНТЕЗ И РАСЧЕТ ИК СПЕКТРОВ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

Беспалов Д. В., Голованова О. А.

Омский государственный университет имени Ф. М. Достоевского (Омск, Россия)

Аннотация. Научный интерес представляют физико-химические характеристики комплексов цинка, обладающих огромным значением для поддержания биологической активности и вследствие их большого потенциала применения в медицине и биотехнологии. Методами Хартри–Фока и DFT/B3LYP/6-31G (p, d) с учетом поляризации среды посредством модели поляризуемого континуума смоделированы структуры лизината и метионата цинка (II). Расчетные инфракрасные спектры сопоставлены с экспериментальными для уточнения геометрии. Предложены модели строения соединений. Данные о координации Zn (II) с аминокислотами важны для изучения малоисследованных комплексов. Результаты применимы при разработке антимикробных, противоопухолевых препаратов.

Ключевые слова: метод функционала плотности, цинк, аминокислота, ИК спектр, синтез

Для цитирования: Беспалов Д. В., Голованова О. А. Лизинат и метионат цинка: синтез и расчет ИК спектров методом функционала плотности // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 495–505. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).495-505

Research Article

ZINC LYSINATE AND METHIONATE: SYNTHESIS AND IR SPECTRUM CALCULATION USING THE DENSITY FUNCTIONAL THEORY METHOD

Bespalov D. V., Golovanova O. A.

Dostoevsky Omsk State University (Omsk, Russia)

Abstract. Of scientific interest are the physicochemical characteristics of zinc complexes, which are essential for maintaining biological activity and have a great potential for use in medicine and biotechnology due to their unique properties. Using the Hartree–Fock method and DFT/B3LYP/6-31G(p,d) with solvent polarization accounted for via the polarizable continuum model, the structures of zinc (II) lysinate and methionate were modeled. The calculated infrared spectra were compared with experimental data to refine the geometries, and structural models of the compounds were proposed. Data on the coordination of Zn (II) with amino acids are important for the study of little-explored complexes. The results are applicable to the development of antimicrobial and antitumor drugs.

Keywords: density functional theory method, zinc, amino acid, IR spectrum, synthesis

For citation: Bespalov D. V., Golovanova O. A. Zinc lysinate and methionate: synthesis and IR spectrum calculation using the density functional theory method // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 495–505. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).495-505

Введение

Цинк относится к числу незаменимых элементов, критически значимых для функционирования биологических систем. Этот ион-металл активно участвует в биохимических реакциях, являясь компонентом свыше трехсот ферментов, которые катализируют различные процессы в организме [1–3]. Его роль включает не только регуляцию активности генов, но и пространственную организацию белковых молекул, определяя их стабильность и функциональность.

Что касается аминокислот, они служат основными структурными единицами протеинов и выполняют важные задачи в обмене веществ, обеспечивая синтез и распад метаболитов [4–6].

Комплексные соединения цинка с аминокислотами представляют интерес в качестве объекта исследования благодаря биологической активности и широкому потенциальному применению в медицине и биотехнологии [7, 8].

Известно, что при образовании таких комплексов ион цинка образует координационные связи с донорными атомами аминокислот – азота в аминогруппе и кислорода в карбоксильной группе ($-\text{COO}^-$). Варьируя условия синтеза, можно получать структуры разной координации, что может влиять на свойства соединений [9].

Особый интерес представляют физико-химические характеристики исследуемых комплексов. Они демонстрируют повышенную устойчивость в водных средах, что делает их пригодными для применения в физиологических условиях без опасности быстрого распада. Кроме того, данные соединения могут выступать катализаторами биохимических процессов, увеличивая скорость реакций за счет активации промежуточных стадий взаимодействий [10].

Некоторые комплексы цинка с аминокислотами демонстрируют антиоксидантную активность, способны нейтрализовать свободные радикалы, предотвращая клеточные повреждения. Фармакологический потенциал таких комплексов подтверждается их многофункциональностью: экспериментальные данные свидетельствуют, что часть из них подавляет рост патогенных микроорганизмов и злокачественных клеток, что актуально для разработки антимикробных и онкологических препаратов нового поколения [11].

Комплексы цинка с метионином и лизином являются не только перспективными терапевтическими агентами, но и эффективными биодоступными формами для обогащения рациона человека и животных. Их применение позволяет оптимизировать усвоение цинка организмом человека, что особенно важно при заболеваниях, связанных с дефицитом этого микроэлемента. Например, метионин, не только улучшает абсорбцию цинка, но и способствует детоксикации организма, что подтверждено исследованиями на моделях хронических поражений печени [12]. Интерес к хелатным комплексам $\text{Zn}^{2+}:\text{Lys}$, $\text{Zn}^{2+}:\text{Met}$ подкреплен их противовоспалительными и антиоксидантными свойствами. Такие соединения

снижают окислительный стресс клеток, что может быть использовано в терапии дерматологических заболеваний. Комплексы цинка и лизина, в свою очередь, стимулируют синтез коллагена и усвоение кальция, что делает их ценными для лечения остеопороза и регенерации тканей. А также может ускорять заживление ран, что связано с активацией ангиогенеза [13].

Цель исследования – создание методами квантово-химического расчета модельных структур лизината и метионат цинка, расчет ИК спектров, сопоставление ИК спектров, полученных теоретическим путем с экспериментальными, уточнения структурных особенностей синтезированных соединений.

Материалы и методы

В рамках исследования для моделирования структуры применялось программное обеспечение GAMESS US, поддерживающее квантово-химические расчеты методами HF и DFT с функционалом B3LYP. Искользованные базисные наборы – 6–31G (p, d) [14]. Для построения геометрии использовалась программа Chemcraft. Для моделирования воздействия конденсированной среды на свойства изучаемого соединения применялась методика поляризуемого континуума (PCM). Для исследуемых комплексов цинка с аминокислотой была выполнена оптимизация геометрии до достижения минимального энергетического состояния, проведен расчет частот нормальных колебательных мод спектров ИК спектроскопии.

Методика синтеза разрабатывалась с опорой на ранее опубликованные работы, где описывалось получение структурно схожих соединений [15]. Процедура синтеза: точные массы аминокислот (1,49 г метионина и 1,64 г лизина) растворяли в 20 мл бидистиллированной воды. При этом, pH раствора регулировали методом электролиза (графитовые электроды) до значений, превышающих изоэлектрическую точку аминокислот, что активировало механизм внутримолекулярного основания. В полученный раствор добавили навеску 1,36 г хлорида цинка (ZnCl_2), после чего реакционную смесь помещали в темное место. Взаимодействие компонентов протекало при комнатной температуре в течение 7 суток, завершаясь образованием кристаллического осадка. Продукт реакции последовательно промывали ледяной дистиллированной водой (0°C) и высушивали для удаления остаточной влаги.

Химический состав синтезированных образцов исследовали методом инфракрасной спектроскопии. Искользовали спектрофотометр ФСМ 2202, с помощью которого регистрировали ИК спектры комплексов цинка с аминокислотами. Измельчали синтезированные образцы в агатовой ступке до мелкодисперсного состояния. Смешивали полученные порошки с KBr в соотношении 1:100. Наносили смеси на германиевую подложку с последующим прессованием для формирования прозрачных таблеток. Измерения проводили в диапазоне

500–4000 см^{-1} с шагом разрешения 1 см^{-1} , что обеспечило детектирование характеристических полос поглощения функциональных групп.

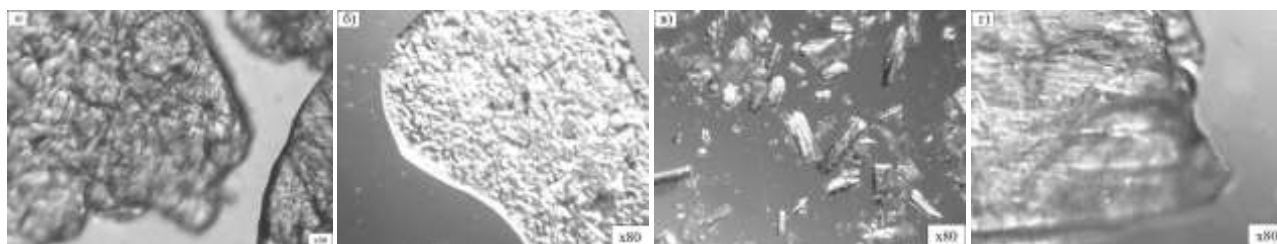
Количественное содержание ионов цинка в образцах определяли с использованием комплексонометрического титрования.

Анализ содержания аминокислоты проводили методом Серенсена – титрования с формальдегидом.

Морфологический анализ синтезированных твердофазных образцов выполняли с использованием оптического микроскопа XSP-140. Подготовленные пробы наносили на предметные стекла с последующей фиксацией. Цифровую регистрацию изображений осуществляли с помощью программного обеспечения Tour View.

Результаты и их обсуждение

Синтезированы координационные соединения цинка с лизином ($\text{Zn}^{2+}:\text{Lys}$) и метионином ($\text{Zn}^{2+}:\text{Met}$) и проанализированы с помощью оптической микроскопией. Вид осадков, представленный на рисунке 1, показал отличия их морфологии от кристаллической структуры исходных аминокислот.



а) АК – метионин

б) $\text{Zn}^{2+}:\text{Met}$

в) АК –лизин

г) $\text{Zn}^{2+}:\text{Lys}$

Рисунок 1. Визуализация морфологии исследуемых соединений на электронном микроскопе XSP-140 при стандартном увеличении 80 крат

ИК спектроскопия выявила изменения в интерпретируемых областях характеристических полос поглощения, ИК-спектры осадков в сравнении с соответствующей АК, представлены на рисунке 2.

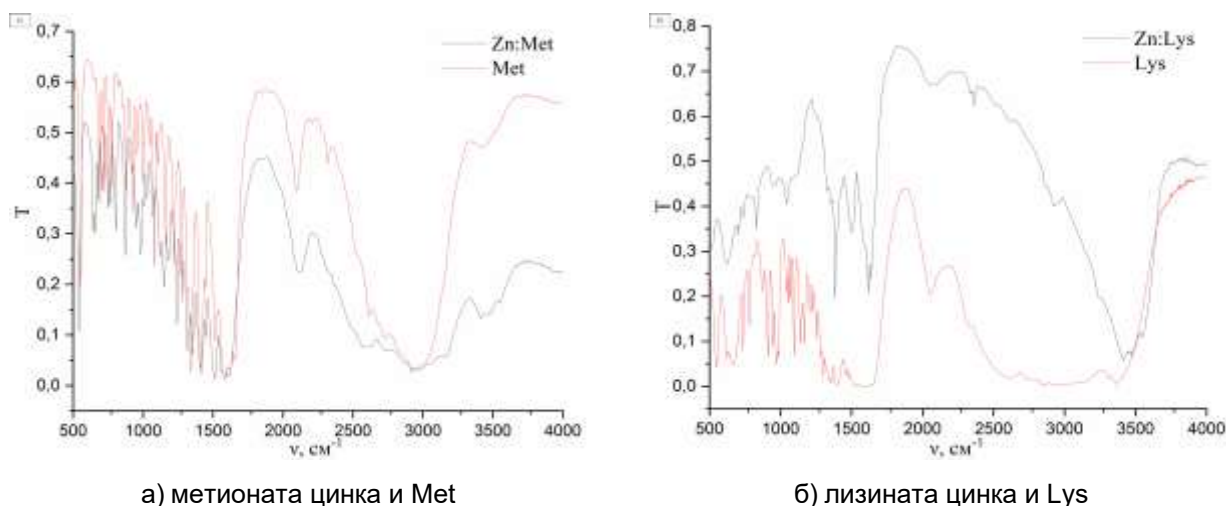


Рисунок 2. ИК спектры синтезированных комплексов цинка и соответствующих АК

Наблюдаемые изменения в ИК-спектрах, включая появление, смещение пиков и перераспределение интенсивностей, позволяют сделать вывод о формировании металлоорганических структур. Полученные данные согласуются с гипотезой о координации цинка через amino- и карбоксильные группы соответствующих аминокислот, а именно метионина и лизина.

Данные количественного анализа синтезированных комплексов, полученные методом титрования, отражены в таблице 1. Согласно результатам, молярное соотношение иона цинка (II) и аминокислот в исследуемых осадках равняется 1:2. Это свидетельствует о формировании соединений, где каждый ион Zn^{2+} координирован двумя молекулами аминокислоты, что согласуется с предполагаемой структурой комплексов.

Таблица 1. Данные титриметрических анализов молярных соотношений цинка (II) и аминокислот в синтезированных комплексах

Определение количества ионов цинка (II)			Определение количества аминокислот	
Осадок	Сн (трилон Б), моль/л	n(Zn^{2+}), моль	С _м (NaOH), моль/л	n(АК), моль
Zn ²⁺ :Lys	0,01	0,0026	0,1	0,0053
Zn ²⁺ :Met	0,01	0,0018	0,1	0,0037

Методами квантово-химического моделирования (DFT/B3LYP) оптимизированы структуры лизината и метионата цинка. Расчетные значения минимальной энергии соединений составили –2750,632 Хартри ($-1,199 \times 10^{-14}$ Дж) и –3354,688 Хартри ($-1,462 \times 10^{-14}$ Дж) соответственно. Визуализация пространственной организации комплексов представлена на рисунке 3.

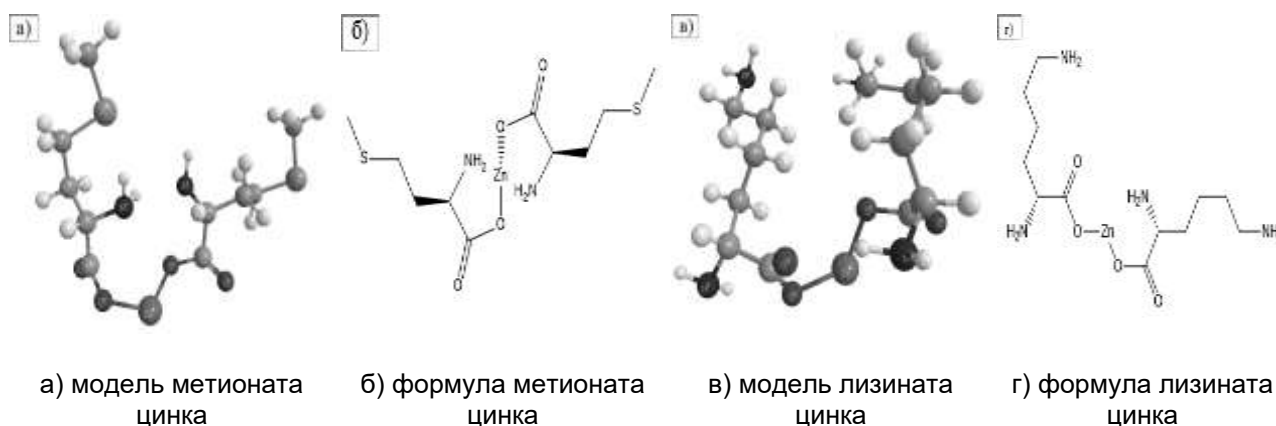


Рисунок 3. Оптимизированные расчетные структуры исследуемых комплексов

Термодинамические параметры моделей (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса, внутренняя энергия) рассчитаны при стандартных условиях (298,15 K) и систематизированы в таблице 2. Использование подобных условий расчета может обеспечивать сопоставимость результатов с опубликованными данными по аналогичным соединениям [11].

Таблица 2. Термодинамические параметры оптимизированных структур цинковых комплексов с лизином и метионином при стандартной температуре (298,15 K)

Модель 1:2	HF	DFT	HF	DFT
	Zn ²⁺ :Lys		Zn ²⁺ :Met	
Энтальпия H, ккал/моль	263,662	280,189	204,393	219,007
Энтропия S, кал/моль K	153,522	148,906	132,759	140,157
Свободная энергия Гиббса, ккал/моль	217,889	235,793	164,811	177,219
Внутренняя энергия U, ккал/моль	262,638	279,597	203,801	218,414

В таблице 3 отражено сопоставление экспериментальных ИК спектров синтезированных комплексов метионата и лизината цинка с выбранными теоретическими расчетными методами (HF и DFT / B3LYP в базе 6–31G (d, p)). Анализ охватывает диапазон 500–4000 см⁻¹, где наблюдаемые расхождения между пиками не превышают 5%, что подтверждает адекватность выбранных методов вычислительных.

Для корректировки теоретически рассчитанных ИК спектров использовали масштабные коэффициенты колебательных частот, учитывающие погрешности квантово-химических методов. Значения коэффициентов (0,961 для DFT / B3LYP / 6–31G (d, p) и 0,903 для HF / 6–31G (d, p)) взяты из открытой базы данных Computational Chemistry Comparison and Benchmark DataBase (CCCBDB).

Анализ теоретических (DFT / 6–31G (p, d)) и экспериментальных ИК спектров лизината цинка демонстрирует следующее.

Таблица 3. Расчетные и экспериментальные частоты колебаний ИК спектров комплексов цинка с лизином и метионином.

Лизинат цинка			Метеонат цинка		
$\nu_{\text{эксп.}}, \text{cm}^{-1}$	$\nu_{\text{DFT}}, \text{cm}^{-1}$	$\nu_{\text{HF}}, \text{cm}^{-1}$	$\nu_{\text{эксп.}}, \text{cm}^{-1}$	$\nu_{\text{DFT}}, \text{cm}^{-1}$	$\nu_{\text{HF}}, \text{cm}^{-1}$
624	590	603	644	626	666
692	691	696	707	703	728
705	712	711	749	740	744
738	750	728	804	788	828
790	780	747	874	864	873
830	835	839	980	970	993
879	871	880	1025	1017	1036
955	961	958	1069	1086	1086
1004	1005	998	1150	1177	1156
1044	1044	1044	1242	1232	1230
1260	1261	1266	1274	1273	1273
1329	1328	1305	1328	1311	1322
1355	1357	1356	1355	1332	1344
1384	1380	1386	1385	1371	1392
1497	1482	1504	1409	1420	1426
1592	1583	1598	1448	1448	1494
1618	1612	1608	1509	1505	1511
1638	1640	1649	1585	1589	1573
1869	1860	1880	1616	1614	1618
2427	2402	2555	1855	1876	1857
2614	2609	2702	2603	2681	2640
2867	2876	2879	2737	2738	2815
2930	2934	2921	2917	2911	2907
2952	2994	2941	2967	2997	2991
3242	3258	3290	3157	3156	3150
3414	3407	3433	3415	3410	3410
3480	3478	3490	3479	3496	3432
3545	3528	3511	3546	3574	3502

1. В спектре модели наблюдается интенсивное поглощение при 1638 cm^{-1} (асимметричные колебания COO^-) и 1260 cm^{-1} (C=O), что коррелирует с экспериментальными пиками синтезированного комплекса $\text{Zn}^{2+}:\text{Lys}$ (1640 cm^{-1} и 1261 cm^{-1}). Расхождение менее 2% подтверждает предположение о взаимодействии иона Zn^{2+} с карбоксильной группой лизина, как и в предложенной модели.

2. Теоретический спектр демонстрирует два выраженных пика асимметричных (3478 cm^{-1}) и симметричных (3258 cm^{-1}) колебаний NH_2 , отсутствующих у лизина из-за его ионного состояния в растворе. В синтезированном комплексе аналогичные полосы обнаружены при 3480 cm^{-1} и 3242 cm^{-1} (погрешность $<2\%$),

что указывает на координацию цинка с аминогруппой по донорно-акцепторному механизму взаимодействия.

3. Отсутствие в модельном спектре полосы $\sim 2006\text{ см}^{-1}$ (характерной для сильных водородных связей $\text{N-H}\cdots\text{O}$) свидетельствует об отсутствии таких взаимодействий в теоретической структуре. Однако ее наличие на экспериментальном ИК спектре подтверждает включение молекул воды в структуру синтезированного комплекса, формирующих водородные связи с аминогруппой.

4. Наличие слабых полос в области $\sim 1860\text{ см}^{-1}$ (1869 см^{-1} в эксперименте, 1860 см^{-1} в модели) согласуется с предположением о образовании координационной связи между ионом цинка(II) и атомом азота аминогруппы.

Исходя из перечисленных рассуждений, синтезированный комплекс $\text{Zn}^{2+}:\text{Lys}$ структурно соответствует расчетной модели, однако содержит дополнительные взаимодействия с молекулами воды со свободными, не взаимодействующими с цинком аминогруппами, что подтверждается ИК спектроскопией. Аналогичный подход, применен к метионату цинка ($\text{Zn}^{2+}:\text{Met}$). Сравнение расчетных (на примере DFT) и экспериментальных ИК спектров позволило выявить особенности координации соединения.

Заключение

Синтезированы комплексные соединения лизината и метионата цинка. Методами квантово-химического моделирования (Хартри-Фок и DFT/B3LYP) оптимизированы структуры исследуемых соединений, определены их энергетически стабильные конфигурации и рассчитаны колебательные спектры в гармоническом приближении. Для обоих комплексов получены термодинамические параметры при стандартных условиях. Методом ИК спектроскопии получены спектры синтезированных соединений. Сравнение расчетных и экспериментальных ИК спектров продемонстрировали высокую корреляцию между собой. Анализ результатов подтвердил, что структурная организация синтезированных соединений соответствует расчетным моделям, за исключением того, что в реальных комплексах возможно наличие воды, взаимодействующей со свободными аминогруппами, что также может объяснять отклонения в спектрах. Установлены составы координации цинка с лизином и метионином (соотношение молей $\text{Zn}:\text{AK}$ 1:2). Данные о координации соединений ионов цинка с аминокислотами, помогают достоверно установить строение их малоизученных комплексов, а также совершенствовать методы синтеза комплексных соединений заранее определенного состава.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023 «Фундаментальная теория кристаллизации ОМА и физико-химических методов исследования патогенного минералообразования в организме человека с целью профилактики, блокирования патогенов и создания биомиметических систем доставки лекарств»).

Список литературы

1. Maret W. Zinc in Cellular Regulation: The Nature and Significance of “Zinc Signals” // International journal of molecular sciences. 2017. 18 (11). 2285. DOI: 10.3390/ijms18112285
2. Wessels I., Maywald M., Lothar R. Zinc as a gatekeeper of Immune function // Nutrients. 2017. 9 (12). 1286. DOI: 10.3390/nu9121286
3. Chasapis C. T., Loutsidou A. C., Spiliopoulou C. A., Stefanidou M. E. Zinc and human health: an update // Archives of toxicology. 2012. 86. 521–534. DOI: 10.1007/s00204-011-0775-1
4. Enass W., Shatha O., Abbas A. Biological activities of amino acid derivatives and their complexes a review // Research journal of pharmaceutical biological and chemical sciences. 2019. 10 (2). 1624–1641.
5. Трошина Е. А., Сенюшкина Е. С. Роль цинка в процессах синтеза и метаболизма гормонов щитовидной железы // Клиническая и экспериментальная тиреоидология, 2020. 16 (3). 25–30. DOI: 10.14341/ket12697
6. Левчук Л. В., Бородулина Т. В., Санникова Н. Е., Данилова, И. Г. Клиническое значение содержания свободных аминокислот для роста и развития детей // Уральский медицинский журнал. 2017. 149 (5). 11–15.
7. Karakousi R., Tsami P., Spanoudaki M., Dalgarno S. Blue-emitting 2D- and 3D-Zinc coordination polymers based on schiff-base amino acid ligands // Chemistry. 2023. 5 (3). 1770–1780. DOI: 10.3390/chemistry5030121
8. Zhang. Y., Li X., Li J., Khan Z. H., Ma F., Liu X. A novel zinc complex with antibacterial and antioxidant activity // BMC Chemistry. 2021. 15 (1). 17. DOI: 10.1186/s13065-021-00745-2
9. Abendrot M., Checinska L., Kusz J., Lisowska K., Zawadzka K., Felczak A., Kalinowska-Lis U. Zinc(II) complexes with amino acids for potential use in dermatology: synthesis, crystal structures, and antibacterial activity // Molecules. 2020. 25 (4). 951. DOI: 10.3390/molecules25040951
10. Ahmed E. A., Soliman A. M. M., Ali A. M., El-Remaily M. A. E. A. A. Boosting the catalytic performance of zinc linked amino acid complex as an eco-friendly for synthesis of novel pyrimidines in aqueous medium // Applied organometallic chemistry. 2021. 35 (5). e6197. DOI: 10.1002/aoc.6197
11. Bossowski A., Stozek K., Rydzewska M., Niklinska W., Gasowska M., Polnik D., Szalecki M., Miklosz A., Chabowski A., Reszec J. Expression of zinc transporter 8 in thyroid tissues from patients with immune and non-immune thyroid diseases // Autoimmunity. 2020. 53 (7). 376–384. DOI: 10.1080/08916934.2020.1815194
12. Mansoor N. B., Jaimin M. P., Dhruv P., Murphy N., Brown R. M., Elsharkawy A. M., Mehta G., Armstrong M. J., Neil D. SARS-CoV-2: is the liver merely

a bystander to severe disease? // *Journal of hepatology*. 2020. 73 (4). 995–996. DOI: 10.1016/j.jhep.2020.05.035

13. Lin P.-H., Sermersheim M., Li H., Lee P. H. U., Steinberg S. M., Ma J. Zinc in wound healing modulation // *Nutrients*. 2018. 10 (1). 16. DOI: 10.3390/nu10010016

14. Mamand D., Qadr H. Density functional theory and computational simulation of the molecular structure on corrosion of carbon steel in acidic media of some amino acids // *Russian journal of physical chemistry*. 2022. 96. 2155–2165. DOI: 10.1134/S0036024422100193

15. Bespalov D. V., Golovanova O. A. Magnesium glycinate and tyrosinate: structure calculations and IR spectra by the DFT method // *Russian journal of physical chemistry A*. 2024. 98 (7). 1380–1387. DOI: 10.1134/S0036024424700377

References

1. Maret W. Zinc in Cellular Regulation: The Nature and Significance of “Zinc Signals” // *International Journal of Molecular Sciences*. 2017. 18 (11). 2285. DOI: 10.3390/ijms18112285

2. Wessels I., Maywald M., Lothar R. Zinc as a gatekeeper of immune function // *Nutrients*. 2017. 9 (12). 1286. DOI: 10.3390/nu9121286

3. Chasapis C. T., Loutsidou A. C., Spiliopoulou C. A., Stefanidou M. E. Zinc and human health: an update // *Archives of toxicology*. 2012. 86. 521–534. DOI: 10.1007/s00204-011-0775-1

4. Enass W., Shatha O., Abbas A. Biological activities of amino acid derivatives and their complexes a review // *Research journal of pharmaceutical biological and chemical sciences*. 2019. 10 (2). 1624–1641.

5. Troshina E. A., Senyushkina E. S. The role of zinc in the synthesis and metabolism of thyroid hormones // *Clinical and experimental thyroidology*. 2020. 16 (3). 25–30. DOI: 10.14341/ket12697 (In Russian).

6. Levchuk L. B., Borodulina T. V., Sannikova N. E., Danilova I. G. The clinical significance of the content of free amino acids for the growth and development of children // *Ural medical journal*. 2017. 149 (5). 11–15. (In Russian).

7. Karakousi R., Tsami P., Spanoudaki M., Dalgarno S. Blue-emitting 2D- and 3D-Zinc coordination polymers based on schiff-base amino acid ligands // *Chemistry*. 2023. 5 (3). 1770–1780. DOI: 10.3390/chemistry5030121

8. Zhang Y., Li X., Li J., Khan Z. H., Ma F., Liu X. A novel zinc complex with antibacterial and antioxidant activity // *BMC Chemistry*. 2021. 15 (1). 17. DOI: 10.1186/s13065-021-00745-2

9. Abendrot M., Checinska L., Kusz J., Lisowska K., Zawadzka K., Felczak A., Kalinowska-Lis U. Zinc(II) Complexes with amino acids for potential use in dermatology: synthesis, crystal structures, and antibacterial activity // *Molecules*. 2020. 25 (4). 951. DOI: 10.3390/molecules25040951

10. Ahmed E. A., Soliman A. M. M., Ali A. M., El-Remaily M. A. E. A. A. Boosting the catalytic performance of zinc linked amino acid complex as an eco-friendly for synthesis of novel pyrimidines in aqueous medium // *Applied organometallic chemistry*. 2021. 35 (5). e6197. DOI: 10.1002/aoc.6197

11. Bossowski A., Stozek K., Rydzewska M., Niklinska W., Gasowska M., Polnik D., Szalecki M., Miklosz A., Chabowski A., Reszec J. Expression of zinc transporter 8 in thyroid tissues from patients with immune and non-immune thyroid diseases // *Autoimmunity*. 2020. 53 (7). 376–384. DOI: 10.1080/08916934.2020.1815194

12. Mansoor N. B., Jaimin M. P., Dhruv P., Murphy N., Brown R. M., Elsharkawy A. M., Mehta G., Armstrong M. J., Neil D. SARS-CoV-2: is the liver merely a bystander to severe disease? // Journal of hepatology. 2020. 73 (4). 995–996. DOI: 10.1016/j.jhep.2020.05.035
13. Lin P.-H., Sermersheim M., Li H., Lee P. H. U., Steinberg S. M., Ma J. Zinc in wound healing modulation // Nutrients. 2018. 10 (1). 16. DOI: 10.3390/nu10010016
14. Mamand D., Qadr H. Density functional theory and computational simulation of the molecular structure on corrosion of carbon steel in acidic media of some amino acids // Russian journal of physical chemistry. 2022. 96. 2155–2165. DOI: 10.1134/S0036024422100193
15. Bespalov D. V., Golovanova O. A. Magnesium glycinate and tyrosinate: structure calculations and IR spectra by the DFT method // Russian journal of physical chemistry A. 2024. 98 (7). 1380–1387. DOI: 10.1134/S0036024424700377

Информация об авторах

Беспалов Дмитрий Вячеславович – преподаватель, Омский государственный университет имени Ф. М. Достоевского (Омск, Россия), ORCID: 0009-0009-1479-8571, d.v.bespalov@rambler.ru

Голованова Ольга Александровна – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой, Омский государственный университет имени Ф. М. Достоевского (Омск, Россия), ORCID: 0000-0001-9995-5672, golovanoa2000@mail.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.955:621.373

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).506-513

Поступила в редакцию / Received 10.07.2025

ГРНТИ 29.19.37; 45.29.31

Специальность ВАК 1.3.8.

Принята к публикации / Accepted 03.10.2025

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СТРУКТУРЕ МЕТГЛАС/ЦТС В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Мисилин В. А., Кузьмин Е. В., Карпов М. М., Петров Р. В.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация. Статья посвящена исследованию магнитоэлектрического эффекта в магнитоэлектрически-пьезоэлектрических слоистых структурах, предназначенных для использования в устройствах сбора энергии. Были проведены исследования магнитоэлектрического коэффициента для разных составов магнитоэлектрического элемента Метглас/ЦТС. Выявлен состав с максимальной характеристикой магнитоэлектрического коэффициента. В структуре АМАГ492/ЦТС-19 размером 30 x 10 x 0,5 мм на частоте около 52 кГц с 3 слоями метгласа МЭ коэффициент составил около 19 В/(см·Э). Была изучена зависимость магнитоэлектрического эффекта в подмагничивающих полях до 400 Гс. Выявлено, что у образца элемента АМАГ202/ЦТС19 максимум характеристики сдвигается от значения подмагничивающего поля в 9 Гс для одной пластины метгласа до значения 12 Гс для двух пластин и значения 28 Гс для трех пластин. Данные проведенных исследований в дальнейшем будут использованы для разработки и оптимизации устройств сбора энергии на основе мультиферроидных материалов.

Ключевые слова: *магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрически-пьезоэлектрические слоистые структуры, устройства сбора энергии на основе мультиферроидных материалов*

Для цитирования: Мисилин В. А., Кузьмин Е. В., Карпов М. М., Петров Р. В. Исследование магнитоэлектрического эффекта в структуре МЕТГЛАС/ЦТС в слабых магнитных полях // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 506–513. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).506-513

Research Article

RESEARCH OF MAGNETOELECTRIC EFFECT IN METGLASS/PZT STRUCTURE IN WEAK MAGNETIC FIELD

Misilin V. A., Kuzmin E. V., Karpov M. M., Petrov R. V.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract. The article is devoted to the study of the magnetoelectric effect in magnetostrictive–piezoelectric layered structures intended for use in energy harvesting devices. Investigations of the magnetoelectric coefficient were carried out for different compositions of the Metglas/PZT magnetoelectric element. The composition with the maximum magnetoelectric coefficient was identified. In the AMAG492/PZT-19 structure with dimensions of 30×10×0.5 mm at a frequency of about 52 kHz with three Metglas layers, the magnetoelectric coefficient reached approximately 19 V/(cm·Oe). The dependence of the magnetoelectric effect on bias magnetic fields up to 400 Oe was studied. It was revealed that in the AMAG202/PZT-19 element, the maximum response shifts from a bias magnetic field of 9 Oe for one Metglas layer to 12 Oe for two layers, and to 28 Oe for three layers. The results of the conducted research will be further used for the development and optimization of energy harvesting devices based on multiferroic materials.

Keywords: *magnetoelectric effect, magnetostrictive-piezoelectric layered structures, energy harvesting devices based on multiferroic materials*

For citation: Misilin V. A., Kuzmin E. V., Karpov M. M., Petrov R. V. Research of magnetoelectric effect in METGLASS/PZT structure in weak magnetic field // Vestnik NovSU. 3 (141). 506–513. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).506-513

Введение

Развитие перспективных отраслей энергетики, в том числе использующих возобновляемые в природе источники, является наиважнейшей задачей современной индустрии. Это позволит создать распределенные энергетические сети. Одним из компонентов такой сети являются устройства сбора энергии. Они, в свою очередь, используют энергию солнца, ветра, геотермальную энергию и пр. Построены такие устройства могут быть с использованием совершенно различных материалов и на разных принципах. Одним из перспективных решений для создания устройств сбора энергии является генератор на магнитоэлектрическом (МЭ) эффекте, разрабатываемый с использованием мультиферроидных материалов.

МЭ материалы, в том числе магнитострикционно-пьезоэлектрические слоистые структуры, использующие МЭ эффект, который заключается в индуцировании электрической поляризации при воздействии на материал внешнего магнитного поля или индуцировании намагничивания при воздействии на материал внешнего электрического поля, в течение многих лет были предметом исследований, направленных на практическое применение их свойств для создания датчиков магнитных полей нового поколения [1, 2]. При воздействии внешнего магнитного поля МЭ элементы могут быть использованы в качестве высокоточных датчиков для измерения слабых магнитных полей и слабых токов [3].

Опубликовано большое количество статей на тему изучения композиционных материалов на основе МЭ эффекта, содержащих магнитострикционную и пьезоэлектрическую фазы. В то же время изучение устройств на их основе остается перспективным. Например, в работе [4] изучался МЭ эффект в композитной системе Ni/PZT/Ni в условиях слабого постоянного магнитного поля. Был изготовлен слоистый композит, состоящий из дисков из никеля (Ni) и пьезоэлектрика PZT, скрепленных эпоксидным клеем. Исследование включало в себя рентгеноструктурный анализ, электрическую и магнитную поляризацию, а также измерения выходного напряжения магнитоэлектрического отклика с использованием динамического метода, при котором переменное магнитное поле 2–64 Э частотой 1.008 кГц накладывается на постоянное подмагничивающее поле в диапазоне 0,7–5 кЭ. Максимальная зарегистрированная авторами работы величина отклика составила 173,5 мВ/см при помагничивающем поле 0,7 кЭ и переменном магнитном поле 64 кЭ. При этом МЭ коэффициент составил 2,48 мВ/см·Э. Авторы подчеркивают, что многослойная структура обеспечивает более эффективную передачу механических напряжений между магнитострикционной и пьезоэлектрической фазами, что приводит

к более высокому выходному сигналу. Исследование показывает потенциальное применение МЭ эффекта в датчиках слабого магнитного поля [4, 5].

В работе [6] представлен обзор исследований МЭ-эффекта как в однофазных, так и в композитных материалах, с особым акцентом на структуры, содержащие магнитострикционную и пьезоэлектрическую фазы. Авторы объясняют механизм МЭ эффекта, который возникает в результате механического взаимодействия между этими фазами. Отмечено, что однофазные материалы проявляют слабый МЭ-эффект при низких температурах, что ограничивает их практическое применение. В отличие от этого, композиционные материалы обладают значительно более высоким МЭ коэффициентом благодаря свойствам взаимодействующих фаз. Особое внимание уделяется многослойным композитам, включающим материалы с высокой магнитострикционной способностью, такие как Терфенол-D и пьезоэлектрические кристаллы типа PMN-PT, которые обеспечивают эффективную передачу механических напряжений. Рассмотрены различные факторы, влияющие на величину МЭ коэффициента, в том числе соотношение толщин фаз и направление магнитострикции. В статье также анализируются экспериментальные данные, полученные группой авторов, и проводится сравнение их с результатами исследований, подтверждающими преимущества многослойных композитов над другими структурами [6–8]. Характеристики ферромагнетиков, таких как никель и редкоземельные сплавы, такие как Терфенол-D, могут быть рассчитаны с помощью теории магнитострикции, которая хорошо объясняет результаты экспериментов, проведенных с этими материалами [9].

В последние годы активно исследуются новые гибридные и наноструктурированные системы, в том числе супер гидрофобные капельные МЭ гибриды [10], нанокомпозиты на основе ферритов с полимерными матрицами [11], а также оптимизированные МЭ-композиты для беспроводной передачи энергии [2]. Эти работы подчеркивают актуальность направления и расширяют возможности практического применения МЭ структур в сборе энергии.

Целью статьи является исследование МЭ коэффициентов в магнитострикционно-пьезоэлектрических композитах в слабых магнитных полях от 0 до 100 Гс. Это позволит нам выбрать наилучшие комбинации слоев композитов для получения максимальной отдачи энергии в устройствах сбора энергии.

Магнитоэлектрический элемент

В нашем исследовании мы изучали МЭ эффект в слоистых структурах Метглас/ЦТС в нормальных климатических условиях в подмагничивающих полях от 0 до 400 Гс. Для магнитострикционной фазы были выбраны сплавы метгласа производства ПАО «МСТАТОР» (г. Боровичи, РФ) АМАГ 183, АМАГ 200С, АМАГ 202, АМАГ 204N, АМАГ 211N, АМАГ 324, АМАГ 492. В качестве пьезоэлектрической составляющей композита был выбран ЦТС-19 фирмы АО «НИИ «ЭЛПА»

(г. Зеленоград, РФ). Были изготовлены МЭ несимметричные элементы путем склеивания поверхностей пьезоэлектрика и метгласа. Направление поляризации пьезоэлектрика, а также направление постоянного и переменного магнитных полей показаны условно на рисунке 1.

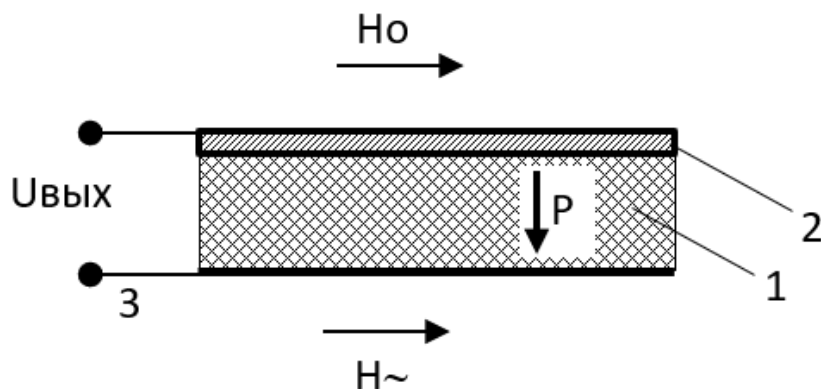


Рисунок 1. МЭ элемент: 1 – ЦТС, 2 – метглас, 3 – электроды

Измерительный стенд

Измерительный стенд был разработан для измерения характеристик МЭ элементов. Структурная схема стенда приведена на рисунке 2.

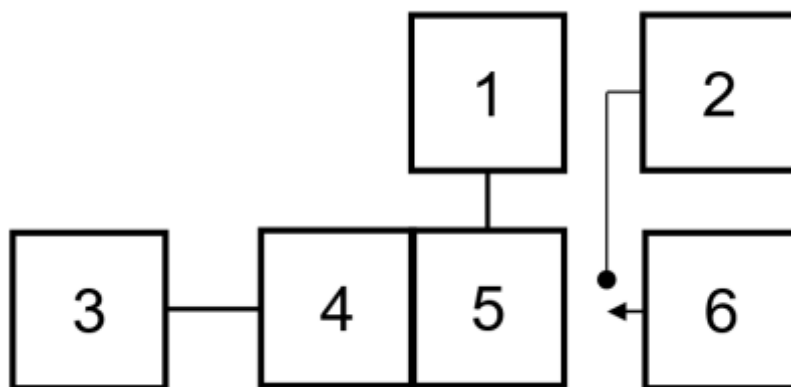


Рисунок 2. Структурная схема стенда. 1 – осциллограф, 2 – магнитометр, 3 – генератор сигналов, 4 – соленоидальная катушка, 5 – МЭ элемент, 6 – постоянный магнит

Стенд состоит из: генератора сигналов цифрового запоминающего осциллографа ADS-2072 (1), магнитометр (2), генератор сигналов GW Instek SFG-71003 (3), соленоидальной катушки (4), МЭ элемента (5), постоянного магнита (6). Данный стенд позволяет измерять напряжение на МЭ элементе в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц. Далее это значение может быть пересчитано в МЭ коэффициент. Переменное магнитное поле внутри соленоидальной катушки на частоте 1 кГц

составляло 1 Э, постоянное магнитное поле составляло от 0 до 400 Гс в зависимости от расстояния до элемента. МЭ коэффициент измерялся в диапазоне частот 0–100 кГц.

Результаты измерений

Были изготовлены и исследованы несколько слоистых МЭ элементов. Каждый элемент содержал один элемент ЦТС-19 размером 30×10×0,5 мм и одного, двух или трех пластин метгласа размером 30×10×0,02 мм. На рисунке 3 приведены данные по МЭ коэффициенту для элементов с разными пластинами метгласа. Электро-механический резонанс в изготовленных МЭ элементах наблюдался на частоте около 50–52 кГц. Значение МЭ коэффициента достигало максимума на резонансной частоте. Максимальное значение МЭ коэффициента наблюдалось при использовании метгласа марки АМАГ 492.

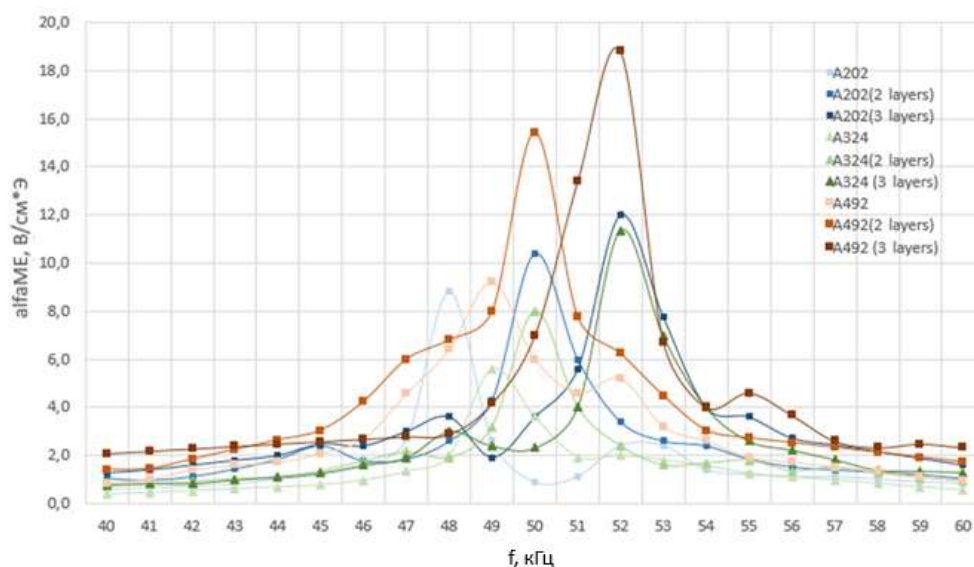


Рисунок 3. Зависимость МЭ коэффициента от частоты

Далее была измерена зависимость МЭ коэффициента от подмагничивающего поля, представленная на рисунке 4.

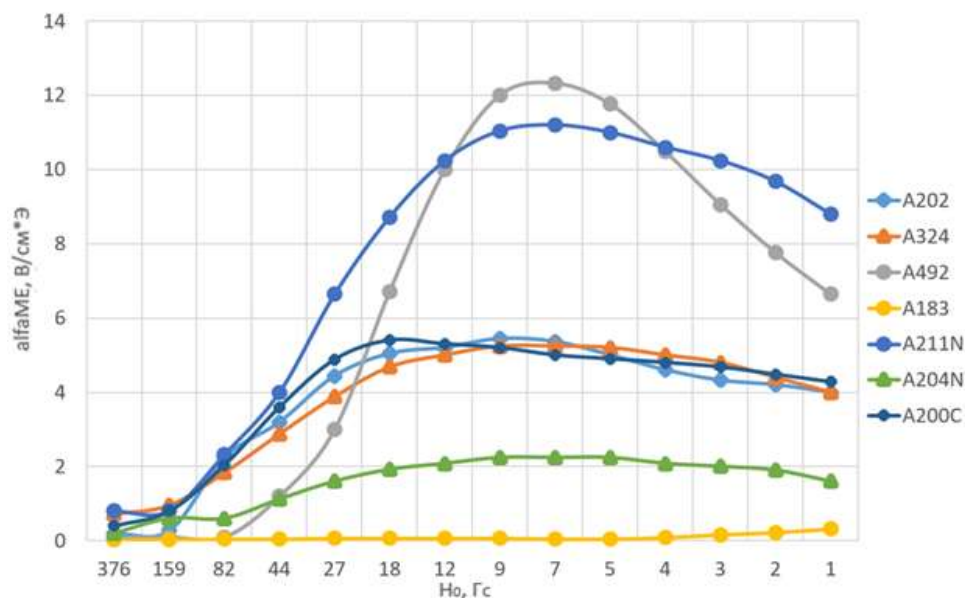


Рисунок 4. Зависимость МЭ коэффициента от подмагничивающего поля в элементах структуры Метглас/ЦТС

Наконец, были проведены исследования МЭ коэффициента при разных величинах подмагничивающего поля в зависимости от числа слоев метгласа для МЭ элемента с метгласом марки АМАГ 202. Эта зависимость представлена на рисунке 5.

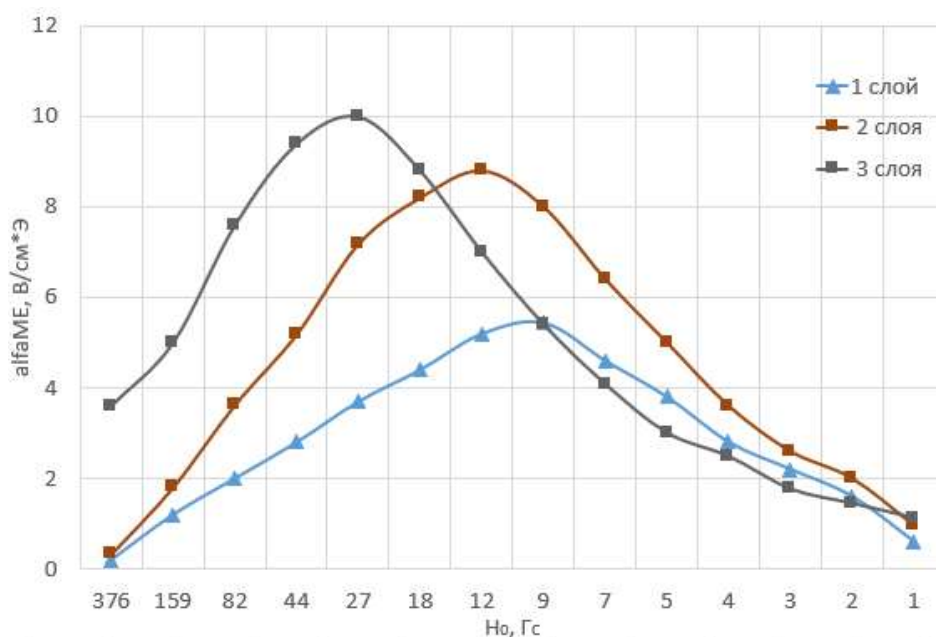


Рисунок 5. Зависимость МЭ коэффициента от подмагничивающего поля для элемента АМАГ 202/ЦТС-19 с разным числом слоев метгласа

Выводы

Были проведены исследования МЭ коэффициента для разных составов МЭ элемента Метглас/ЦТС. Выявлен состав с максимальной характеристикой МЭ коэффициента. В структуре АМАГ492/ЦТС-19 размером 30 x 10 x 0,5 мм на частоте около 52 кГц с 3 слоями метгласа МЭ коэффициент составил около 19 В/(см·Э). Была изучена зависимость МЭ эффекта в подмагничивающих полях до 400 Гс. Выявлено, что у образца элемента АМАГ202/ЦТС19 максимум характеристики сдвигается от значения подмагничивающего поля в 9 Гс для одной пластины метгласа до значения 12 Гс для двух пластин и значения 28 Гс для трех пластин. Данные проведенных исследований в дальнейшем будут использованы для разработки и оптимизации устройств сбора энергии на мультиферроидных материалах.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-19-20045, <https://rscf.ru/project/24-19-20045/>).

Список литературы / References

1. Nan C. W., Bichurin M. I., Dong Sh., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions // *Journal of applied physics*. 2008. 103 (3). 031101. DOI: 10.1063/1.2836410
2. Kumar A., Newacheck S., Youssef G. Cumulative optimization of magnetoelectric composite-based wireless energy transfer // *Engineering research express*. 2024. 6. DOI: 10.1088/2631-8695/ad81b0
3. Liang X., Chen H., Sun N. Magnetoelectric materials and devices // *APL Materials*. 2021. 9 (4). 041114. DOI: 10.1063/5.0044532
4. Babu S., Kuchipudi S., Suryanarayana S., Siddeshwar A., Bhimasankaram T. Low magnetic field magnetoelectric studies of Ni/PZT/Ni composite sensor // *National conference on advances in sensors for aerospace applications (14–15 December, 2007)*. India, Hyderabad: Research Centre Imarat Publ., 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/344300082_Low_magnetic_field_magnetoelectric_studies_of_NiPZTNi_composite_sensor/references#fullTextFileContent (Accessed: 07.07.2025).
5. Deng Zh., Dapino M. Review of magnetostrictive vibration energy harvesters // *Smart materials and structures*. 2017. 26 (10). 103001. DOI: 10.1088/1361-665X/aa8347
6. Ryu J., Priya Sh., Uchino K., Kim H.-J. Magnetoelectric effect in composites of magnetostrictive and piezoelectric materials // *Journal of electroceramics*. 2002. 8. 107–119. DOI: 10.1023/A:1020599728432
7. Bochenek D., Niemiec P., Chrobak A. Effect of chemical composition on magnetic and electrical properties of ferroelectromagnetic ceramic composites // *Materials*. 2021. 14. 2488.
8. Bochenek D., Chrobak A., Dercz G., Niemiec P., Brzezińska D., Czaja P. The Influence of Terfenol-D content on the structure and properties of multiferroic

composites obtained based on PZT-type material and Terfenol-D // *Materials*. 2025. 18. 235. DOI: 10.3390/ma18020235

9. Li P., Wen Y., Bian L. Enhanced magnetoelectric effects in composite of piezoelectric ceramics, rare-earth iron alloys, and ultrasonic horn // *Applied physics letters*. 2007. 90. 022503. DOI: 10.1063/1.2431469

10. Ma Z., Ai J., Shi Y., Wang K., B Su. A superhydrophobic droplet - based magnetoelectric hybrid system to generate electricity and collect water simultaneously // *Advanced materials*. 2020. 32. 2006839.

11. Prahadan S., Deshmukh P., Jha S. N., Satapathy S., Majumder S. Solar energy harvesting in magnetoelectric coupled manganese ferrite nanoparticles incorporated nanocomposite polymer films // *arXiv:2211.01007*. URL: <https://arxiv.org/abs/2211.01007>. DOI: 10.48550/arXiv.2211.01007

Сведения об авторах

Мисилин Василий Александрович – аспирант, инженер-исследователь, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-5044-5831, marsbasil@yandex.ru

Кузьмин Евгений Валентинович – младший научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-7348-290X, 7777744444@mail.ru

Карпов Михаил Михайлович – аспирант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-4343-5897, s224890@std.novsu.ru

Петров Роман Валерьевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9751-116X, roman.petrov@novsu.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.396.67:519.61

ГРНТИ 47.45.29+27.41.17

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).514-521

Специальность ВАК 1.3.8; 2.2.2

Поступила в редакцию / Received 21.07.2025

Принята к публикации / Accepted 28.09.2025

Научная статья

ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ИМПЕДАНСНОЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННЫ

Эминов С. И., Сочилин А. В.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация. В работе изучается проволочная антенна произвольной конфигурации. На поверхности антенны выполняется импедансное граничное условие. Оно связывает касательные составляющие электрического и магнитного полей. Использование граничного условия и представление электрического поля через функцию Грина приводит к двумерному интегральному уравнению относительно плотности поверхностных токов. Непосредственное численное решение интегрального уравнения представляется проблемной, так как ядро уравнения обращается в бесконечность, когда точка наблюдения совпадает с точкой излучения. Поэтому в ядре уравнения выделяется особенность и уравнение приводится к виду, допускающему эффективное численное решение на ЭВМ. Исследован оператор, описывающий интегральное уравнение. Выбраны функциональные пространства и показано, что оператор представим в виде суммы обратимого оператора и компактного оператора. Поэтому интегральное уравнение относится к корректной задаче в соответствующих пространствах.

Ключевые слова: проволочная антенна, импедансное граничное условие, электрическое поле, магнитное поле, двумерное интегральное уравнение, численный метод, особенность в ядре, корректная задача, функция Грина, численный эксперимент, результаты численного анализа

Для цитирования: Эминов С. И., Сочилин А. В. Интегро-дифференциальное уравнение импедансной криволинейной вибраторной антенны // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 514–521. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).514-521

Research Article

INTEGRO-DIFFERENTIAL EQUATION OF AN IMPEDANCE CURVILINEAR VIBRATOR ANTENNA

Eminov S. I., Sochilin A.V.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract. In this paper we study a wire antenna of arbitrary configuration. An impedance boundary condition is applied on the surface of the antenna. This condition relates the tangential components of the electric and magnetic fields. The use of the boundary condition and the representation of the electric field through the Green's function lead to a two-dimensional integral equation for the surface current density. A direct numerical solution of the integral equation is problematic, since the kernel of the equation becomes singular when the observation point coincides with the source point. Therefore, the singularity is isolated in the kernel, and the equation is transformed into a form that allows for efficient numerical solution on a computer. The operator describing the integral equation is investigated. Appropriate functional spaces are chosen, and it is shown that the operator can be represented as the sum of an invertible operator and a compact operator. Therefore, the integral equation corresponds to a well-set problem in the respective spaces.

Keywords: *wire antenna, impedance boundary condition, electric field, magnetic field, two-dimensional integral equation, numerical method, kernel singularity, well-set problem, Green's function, numerical experiment, numerical analysis results*

For citation: Eminov S. I., Sochilin A. V. Integro-differential equation of an impedance curvilinear vibrator antenna // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 514–521. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).514-521

Введение

Проволочная антенна произвольной формы впервые изучена и численно исследована в работах [1, 2]. В этих работах предполагалось, что ядро интегрального уравнения непрерывно. Расстояние между точкой излучения и точкой наблюдения не меньше радиуса проволочной антенны. Поэтому этот метод является приближенным. Точные методы исследования интегральных уравнений дифракции электромагнитных волн на незамкнутых поверхностях разработаны в работах [3–5]. А в статье [6] предложен численный метод для решения задач дифракции на произвольных незамкнутых поверхностях. Вместе с тем в работах [1, 6] предполагалось, что поверхность антенны или дифракции – идеально проводящая. Реальные антенны являются металлическими или покрыты слоем диэлектрика. На поверхности таких антенн выполняются более общие граничные условия, а именно импедансные граничные условия. Эти условия связывают тангенциальные составляющие электрических и магнитных полей. Использование представления электрического поля через поверхностные токи и импедансного граничного условия приводит к двумерному интегральному уравнению.

Целью данной работы является теоретическое исследование и численное решение двумерного интегрального уравнения проволочной антенны произвольной конфигурации.

Двумерное интегральное уравнение криволинейной импедансной вибраторной антенны

Рассмотрим проволочную вибраторную антенну, образующая которой в пространстве описывается формулами [7]

$$x = x(\tau), y = y(\tau), z = z(\tau), \quad -1 \leq \tau \leq 1. \quad (1)$$

Антенну предполагаем тонкой. Это означает, что ее радиус a много меньше длины волны и длины антенны. Найдем коэффициент Ламе и орт:

$$H_\tau = \sqrt{x'^2(\tau) + y'^2(\tau) + z'^2(\tau)}, \quad \vec{e}_\tau = \frac{x'(\tau)\vec{i} + y'(\tau)\vec{j} + z'(\tau)\vec{k}}{H_\tau}. \quad (2)$$

На поверхности вибраторной антенны выполняется импедансное граничное условие [8]

$$E_{\tau}^{\text{BT}} + E_{\tau}^0 = Zj_{\tau}, \quad (3)$$

где E_{τ}^{BT} – вторичное электрическое поле, E_{τ}^0 – первичное электрическое поле, Z – поверхностный импеданс, j_{τ} – плотность поверхностных токов.

Переходя от плотности тока к полному току [9] по формуле $I(\tau) = 2\pi a j_{\tau}(\tau)$, получим интегральное уравнение [6]

$$\begin{aligned} \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 I(\tau) \frac{\partial^2}{\partial \tau \partial t} S(\tau, t) dt - \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 I(\tau) (kH_{\tau})(kH_t) (\vec{e}_{\tau} \cdot \vec{e}_t) S(\tau, t) dt + \\ + iH_{\tau} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{Z}{2\pi a} I(\tau) = iH_{\tau} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{\tau}^0(\tau). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь \vec{e}_{τ} и \vec{e}_t – орты, касательные к образующей проволоочной антенны в точках τ и t ,

$$S(\tau, t) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\pi} \frac{\exp(-ikR)}{4\pi kR} d\varphi, \quad (5)$$

$$R = \sqrt{R_0^2 + 4a^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad (6)$$

$$R_0 = \sqrt{[x(\tau) - x(t)]^2 + [y(\tau) - y(t)]^2 + [z(\tau) - z(t)]^2}, \quad (7)$$

k – волновое число.

Одномерное гиперсингулярное уравнение

Ядро интегрального уравнения (5) имеет особенность, оно обращается в бесконечность, когда $\varphi = 0$. Кроме того, ядро аналитически не интегрируемо по переменной φ . Применим следующий математический прием [5]: представим ядро в виде суммы двух слагаемых, одно из которых аналитически интегрируемо, а второе – непрерывно и эффективно может быть вычислено на ЭВМ. С этой целью введем в рассмотрение следующий интеграл

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{R} d\varphi = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{\sqrt{R_0^2 + a^2 \varphi^2}} d\varphi = \frac{1}{\pi a} \left[\ln \left(\pi a + \sqrt{(\pi a)^2 + R_0^2} \right) + \ln \frac{1}{R_0} \right]. \quad (8)$$

После выделения особенности с помощью формулы (8) и несложных преобразований получим одномерное интегро-дифференциальное гиперсингулярное уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4\pi^2(ka)} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{-1}^1 I(t) \frac{\partial}{\partial t} \ln \frac{1}{|\tau-t|} dt + iH_\tau \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{Z}{2\pi a} I(\tau) - \\ & - \frac{1}{4\pi^2(ka)} \int_{-1}^1 I(t) (kH_\tau)^2 \ln \frac{1}{|\tau-t|} dt + \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 I(t) \frac{\partial^2}{\partial \tau \partial t} S_1(\tau, t) dt - \\ & \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 I(t) S_2(\tau, t) dt = iH_\tau \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_\tau^0(\tau), \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} S_1(\tau, t) &= \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\exp(-ikR)}{4\pi kR} - \frac{1}{k\tilde{R}} \right) d\varphi + \frac{1}{\pi ka} \ln(\pi ka + \sqrt{(\pi ka)^2 + (kR_0)^2}) + \frac{1}{\pi ka} \ln \frac{|\tau-t|}{kR_0}, \\ S_2(\tau, t) &= \frac{1}{\pi} (kH_\tau)(kH_t)(\vec{e}_\tau \cdot \vec{e}_t) \int_0^\pi \left(\frac{\exp(-ikR)}{4\pi kR} - \frac{1}{k\tilde{R}} \right) d\varphi + \frac{1}{\pi ka} (kH_\tau)(kH_t)(\vec{e}_\tau \cdot \vec{e}_t) \ln(\pi ka + \\ & \sqrt{(\pi ka)^2 + (kR_0)^2}) + \frac{1}{\pi} (kH_\tau)(kH_t)(\vec{e}_\tau \cdot \vec{e}_t) \ln \frac{1}{kR_0} + \frac{1}{\pi ka} (kH_\tau)^2 \ln \frac{1}{|\tau-t|}. \end{aligned}$$

Операторное уравнение импедансной криволинейной проволочной антенны

Важно отметить, что запись интегрального уравнения (9) соответствует математическому методу преобразования ядра. А теперь запишем это уравнение в операторной форме:

$$\frac{1}{4\pi(ka)} (AI)(\tau) + (BI)(\tau) = e(\tau), \quad (10)$$

где A обозначает главный гиперсингулярный оператор задачи,

$$\begin{aligned} (BI)(\tau) &= iH_\tau \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{Z}{2\pi a} I(\tau) + (LI)(\tau) + (M_1 I)(\tau) + (M_2 I)(\tau) \\ (AI)(\tau) &= \frac{1}{\pi} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{-1}^1 I(t) \frac{\partial}{\partial t} \ln \frac{1}{|\tau-t|} dt, \\ (LI)(\tau) &= -\frac{1}{4\pi^2(ka)} \int_{-1}^1 I(t) (kH_\tau)^2 \ln \frac{1}{|\tau-t|} dt, \\ (M_1 I)(\tau) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 I(t) \frac{\partial^2}{\partial \tau \partial t} S_1(\tau, t) dt, \\ (M_2 I)(\tau) &= -\frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 I(t) S_2(\tau, t) dt, \\ e(\tau) &= iH_\tau \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_\tau^0(\tau). \end{aligned}$$

В работах [3, 10] доказано, что оператор A непрерывно отображает функциональное пространство $H_{\frac{1}{2}}(-1,1)$ на все пространство $\tilde{H}_{-\frac{1}{2}}(-1,1)$. При этом обратный оператор A^{-1} также ограничен и определяется выражением

$$(A^{-1}f)(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 f(t) \ln \left| \frac{\tau-t}{1-\tau t + \sqrt{1-\tau^2} \sqrt{1-t^2}} \right| dt. \quad (11)$$

Поскольку оператор $A^{-1}B$ оказывается компактным [5], то уравнение (10) эквивалентно уравнению Фредгольма второго рода.

Численное решение операторного уравнения. Вычисление матричных элементов

Уравнение (10) эффективно решается методом Галеркина или же численно-аналитическим методом с использованием функций

$$\varphi_n(\tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi n}} \sin(n \arccos(\tau)) = \sqrt{\frac{2}{\pi n}} \sqrt{1-\tau^2} U_n(\tau), n = 1, 2, 3, \dots, \quad (12)$$

где $U_n(\tau)$ – полиномы Чебышева второго рода: $U_1(\tau) = 1$, $U_2(\tau) = 2\tau$, $U_3(\tau) = 4\tau^2 - 1$.

Матрица оператора A в данном базисе оказывается единичной:

$$(A\varphi_m, \varphi_n) = \begin{cases} 0, & m \neq n, \\ 1, & m = n. \end{cases} \quad (13)$$

Матрица единичного оператора находится аналитически с помощью табличного интеграла

$$(\varphi_{2j-1}, \varphi_{2i-1}) = \frac{\sqrt{(2i-1)(2j-1)}}{2\pi(i-j+\frac{1}{2})(j-i+\frac{1}{2})(i+j-\frac{3}{2})(i+j-\frac{1}{2})}. \quad (14)$$

Матрица оператора L находится аналитически, если коэффициент Ламе H_τ является постоянной величиной. В общем случае интеграл с логарифмической особенностью преобразуется по формуле

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 M(\tau, t) \ln|\tau - t| dt d\tau = \\ = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (M(\tau, t) - M(\tau, \tau)) |\tau - t| dt d\tau + \int_{-1}^1 M(\tau, \tau) \int_{-1}^1 \ln|\tau - t| dt d\tau. \end{aligned} \quad (15)$$

Первый интеграл в правой части (15) эффективно находится численно, а во втором интегрирование по переменной t проводится аналитически.

Пример численного расчета

Пусть образующая проволочной вибраторной антенны задается соотношениями: $x = r_0 \cos(\varphi_0 \tau)$, $y = r_0 \sin(\varphi_0 \tau)$, $z = b\tau$, $-1 \leq \tau \leq 1$. Параметры антенны принимают следующие значения: $\frac{r_0}{\lambda} = 0,2$, $\frac{b}{\lambda} = 0,15$, λ – длина волны в свободном пространстве, $\varphi_0 = 0,16$, $ka = \frac{\pi}{120}$, $Z = 12\pi i$. В таблице 1 приведены значения входного сопротивления, вещественная R и мнимая части X , в зависимости от числа базисных функций N . Правая часть определяется так же, как и в работе [7] с параметром $T = 0,01$.

Таблица 1. Значения входного сопротивления в зависимости от числа базисных функций N

N	2	3	4	5	10	20
R , Ом	33,4927	33,8573	33,8088	33,7919	33,8172	33,8133
X , Ом	3,0141	3,9269	3,8739	3,8469	3,8221	3,8291

Результаты, представленные в таблице 1, показывают хорошую сходимость развитого в данной работе метода.

Заключение

Таким образом, в работе предложен метод расчета проволочных антенн произвольной формы, на поверхности которых выполняются импедансные граничные условия. В основе метода лежит вывод двумерного интегрального уравнения на основе граничных условий и его преобразование к виду, допускающему эффективное численное решение. Поскольку полученное уравнение эквивалентно уравнению Фредгольма второго рода, то численное решение полученного уравнения является корректной задачей. В заключении работы рассмотрен пример численного решения, приведена таблица сходимости метода в зависимости от числа базисных функций.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации НИР «Математическое моделирование природных процессов», выполняемой по государственному заданию в сфере научной деятельности.

Список литературы

1. Mei K.K. On the integral equations of thin wire antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1965. 13 (3). 374–378. DOI: 10.1109/TAP.1965.1138432
2. Вычислительные методы в электродинамике. Москва: Мир, 1977. 485 с.

3. Stephan E.P. Boundary integral equations for screen problem in IR^3 // Integral equations and operator theory. 1987. 10. 236–257. DOI: 10.1007/BF01199079
4. Ильинский А.С., Смирнов Ю.Г. Интегральные уравнения для задач дифракции волн на экранах // Радиотехника и электроника. 1994. 39 (1). 23–31.
5. Ильинский А. С., Смирнов Ю. Г. Дифракция электромагнитных волн на проводящих тонких экранах: псевдодифференциальные операторы в задачах дифракции. Москва: ИПРЖ «Радиотехника», 1996. 176 с.
6. Давыдов А. Г., Захаров Е. В., Пименов Ю. В. Метод численного решения задач дифракции электромагнитных волн на незамкнутых поверхностях произвольной формы // Доклады АН СССР. 1984. 276 (1). 96–100.
7. Социлин А. В., Эминов С. И. Численно-аналитический метод расчета криволинейных вибраторных антенн // Радиотехника и электроника. 2017. 62 (1). 59–64. DOI: 10.7868/S0033849417010144
8. Васильев Е. Н. Возбуждение тел вращения. Москва: Радио и связь, 1987. 272 с.
9. Неганов В. А., Табаков Д. П., Яровой Г. П. Современная теория и практические применения антенн: монография. Москва: Радиотехника, 2009. 720 с.
10. Эминов С. И. Аналитическое обращение операторной матрицы задачи дифракции на отрезке цилиндра в пространствах Соболева // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2021. 61 (3). 450–456. DOI: 10.31857/S0044466921030054

References

1. Mei K. K. On the integral equations of thin wire antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1965. 13 (3). 374–378. DOI: 10.1109/TAP.1965.1138432
2. Computational methods in electrodynamics. Moscow: Mir Publ., 1977. 485 p. (In Russian).
3. Stephan E.P. Boundary integral equations for screen problem in IR^3 // Integral equations and operator theory. 1987. 10. 236–257. DOI: 10.1007/BF01199079
4. Ilyinsky A. S., Smirnov Yu. G. Integral equations for diffraction problems on screens // Journal of Communications Technology and Electronics. 1994. 39 (1). 23–31. (In Russian).
5. Ilyinsky A. S., Smirnov Yu. G. Diffraction of electromagnetic waves on conductive thin screens. Moscow: IPRZh Publ., 1996. 173 p. (In Russian).
6. Davydov A. G., Zakharov E. V., Pimenov Yu. V. A numerical method for solving diffraction problems of electromagnetic waves on open surfaces of arbitrary shape. // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 1984. 276 (1). 96–100. (In Russian).
7. Sochilin A. V., Eminov S. I. A numerical–analytical method for calculation of curved dipole antennas // Journal of communications technology and electronics. 2017. 62 (1). 55–60. DOI: 10.1134/S1064226917010132
8. Vasilev E. N. Rotational excitation. Moscow: Radio and communication Publ., 1987. 272 p. (In Russian).
9. Neganov V. A., Tabakov D. P., Yarovoy G. P. Modern theory and practical applications of antennas. Moscow: Radio Engineering Publ., 2009. 720 p. (In Russian).

10. Eminov S. I. Analytical inversion of the operator matrix of the diffraction problem on a cylinder segment in Sobolev spaces // The Journal of computational mathematics and mathematical physics. 2021. 61 (3). 450–456. DOI: 10.31857/S0044466921030054 (In Russian).

Информация об авторах

Эминов Стефан Ильич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9497-8234, Stefan.Eminov@novsu.ru

Сочилин Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 00090001-6857-7418, Andrey.Sochilin@novsu.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК НОВГУ»

Рукопись статьи должна быть тщательно вычитана автором (-ами) перед предоставлением в редакцию журнала.

К рассмотрению принимается только полный комплект документов:

- 1) статья, оформленная строго в соответствии с требованиями;
- 2) лицензионный договор от каждого соавтора статьи;
- 3) экспертное заключение о возможности опубликования (экспортный контроль);
- 4) заключение о возможности открытого опубликования (государственная тайна).

Автор подписывает *Лицензионный договор о предоставлении права использования произведения* на русском языке (для зарубежных авторов – его *английскую версию*). Если у статьи несколько соавторов, лицензионный договор составляется *на каждого из них в отдельности*. При возникновении затруднений воспользуйтесь "Памяткой по заполнению лицензионного договора", высылаемой редакцией по запросу.

В экспертных заключениях *обязательно* должны быть: подпись эксперта (-ов), руководителя экспертной группы или руководителя организации; гербовая печать / печать организации, дата. Отсканированная копия экспертного заключения, лицензионный договор и электронный вариант статьи отправляются в редакцию журнала по адресу электронной почты vestnik@novsu.ru.

Комплект документов считается принятым к рассмотрению *после официального подтверждения*, поступившего ответным письмом с электронной почты журнала. Если у статьи несколько соавторов, необходимо указать, кто является корреспондирующим автором.

Все полученные статьи после рассмотрения по формальным признакам подвергаются обязательному рецензированию. Качество публикуемых статей контролируется редколлегией, в состав которой входят ведущие ученые российских и зарубежных вузов и академических институтов.

Плата с авторов за публикацию не взимается, гонорары не выплачиваются, поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Напоминаем нашим авторам, что научный журнал «Вестник НовГУ» включен в Перечень ВАК с 2010 г., с 2022 г. в ранжированном списке ему присвоена категория К2. Все вопросы, связанные с публикацией, сроками, оформлением сопроводительных документов следует направлять на электронную почту редакции vestnik@novsu.ru.

С уважением, редакция журнала



Журнал «Вестник Новгородского государственного университета» входит в перечень ведущих научных журналов и изданий России, рекомендуемых ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней. Индексируется в базах данных РИНЦ, EBSCO и Ulrich's Periodicals Directory.