



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

2026 Том 27 № 1

DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Научный журнал

Издается с 2000 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич — доктор технических наук, профессор, директор инженерной академии, заведующий кафедрой механики и процессов управления инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

Заместитель главного редактора

Резник Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», факультет «Специальное машиностроение», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Ответственный секретарь

Агасиева Светлана Викторовна — кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

Члены редакционной коллегии

Агравал Бридж — профессор, Военно-морская школа, Монтерей, США

Алифанов Олег Михайлович — академик РАН, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

Варатараджу Ренугант — профессор, Университет Путра Малайзия, Серданг, Малайзия

Василе Массимiliano Л. — профессор, Университет Стратклайда, Глазго, Великобритания

Вивьяни Антонио — профессор, Университет Кампани «Луиджи Ванвители», Неаполь, Италия

Гасбарри Паоло — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Герман Анна — профессор, Университет Бейра-Интеритор, Ковильян, Португалия

Гитас Иоаннис Зоис — профессор, Университет Аристотеля в Салониках, Салоники, Греция

Грациани Филиппо — почетный профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Гурфил Пини — почетный профессор, Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

Дэкс Мориба — доцент, Техасский университет в Остине, Остин, США

Дженни Джанкарло — профессор, Туринский политехнический институт, Турин, Италия

Кавазути Дзюнъитиро — профессор, Японское агентство аэрокосмических исследований, Токио, Япония

Калугин Владимир Тимофеевич — доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Капустин Владимир Михайлович — доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, Российская Федерация

Кузнецов Николай Борисович — профессор, Геологический институт РАН, Москва, Российская Федерация

Лингарес Ричард — профессор, Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

Матюшин Максим Михайлович — доктор технических наук, Центр управления полетами ЦНИИмаш, ГК «Роскосмос», Королев, Российская Федерация

Медведев Андрей Всеволодович — доктор физико-математических наук, член-корреспондент СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

Мисра Арун — профессор, Университет Макгилла, Монреаль, Канада

Мортари Даниэле — профессор, Техасский университет А&М, Колледж-Стейшн, США

Мохаммед Сейду О. — профессор, Национальное агентство по космическим исследованиям и развитию, Абуджа, Нигерия

Палмерини Джованни — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Петухов Вячеслав Георгиевич — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

Попков Юрий Соломонович — академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт системного анализа, ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Российская Федерация

Попов Гарри Алексеевич — академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

Прадо Антонио — профессор, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия

Редько Иван Яковлевич — доктор технических наук, профессор, Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского, Москва, Российская Федерация

Спенсер В. Дэвид — профессор, Университет штата Пенсильвания, Университи-Парк, США

Фурфаро Роберто — профессор, Университет Аризоны, Тусон, США


Челани Фабио — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Черн Рок Ченг-Шинг — профессор, Университет Райерсона, Торонто, Канада

Ясака Тэцуо — почетный профессор, Университет Кюсю, Фукуока, Япония

**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ) 

Периодичность: 4 выпуска в год (ежеквартально).

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: Белый список РЦНИ, РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, Dimensions, ResearchBib, Lens, Research4Life, JournalTOCs, British Library, Bodleian Libraries (University of Oxford), Ghent University Library.

Цель и тематика

Журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» — периодическое международное рецензируемое научное издание в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения. Журнал является международным по составу редакционной коллегии, авторам и тематике публикаций. В журнале публикуются результаты оригинальных научных исследований российских и зарубежных ученых.

Цели журнала:

- содействие развитию российских и зарубежных инженерных школ;
- продвижение и внедрение в практику современных перспективных разработок в указанных областях;
- научный обмен и сотрудничество между учеными.

Журнал входит в перечень изданий, публикации которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ) при защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям:

- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки);
- 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки);
- 2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки);
- 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки);
- 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки).

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде, правила оформления статей и дополнительная информация размещены на сайте <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Редколлегия журнала строго придерживается международных стандартов публикационной этики, сформулированных в документе COPE (Committee on Publication Ethics): <http://publicationethics.org>

Редактор *И.Л. Панкратова*

Редактор англоязычных текстов *А.С. Корзин, Е.Ф. Шалеева, Н.А. Алексеева*
Компьютерная верстка *Н.В. Маркеловой*

Адрес редакции:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Адрес редакционной коллегии журнала

«Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования»:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Подписано в печать 23.03.2026. Выход в свет 30.03.2026. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 15,11. Тираж 500 экз. Заказ № 1. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН им. Патриса Лумумбы

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

2026 Volume 27 Number 1

DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Editor-in-Chief

Yury N. Razoumny — Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Academy of Engineering, Head of the Department of Mechanics and Control Processes of the Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Associate Editor-in-Chief

Sergey V. Reznik — Dr. (Technical Sciences), Professor, Head of the Department SM-13 "Composite Materials for Aerospace", Special Machinery Faculty, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Assistant to the Editor-in-Chief

Svetlana V. Agasieva — Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Editorial Board

Brij Agrawal — Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

Oleg M. Alifanov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Fabio Celani — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Rock Jeng-Shing Chern — Professor, Ryerson University, Toronto, Canada

Roberto Furfaro — Professor, University of Arizona, Tucson, USA

Paolo Gasbarri — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Giancarlo Genta — Professor, Polytechnic University of Turin, Turin, Italia

Ioannis Zois Gitas — Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

Filippo Graziani — Full Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Anna Guerman — Professor, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal

Pini Gurfil — Full Professor, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

Moriba Jah — Associate Professor, University of Texas at Austin, Austin, USA

Vladimir T. Kalugin — Dr. (Technical Sciences), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Vladimir M. Kapustin — Dr. (Technical Sciences), Professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Gubkin University), Moscow, Russian Federation

Junichiro Kawaguchi — Professor, Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan

Nikolay B. Kuznetsov — Professor, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Richard Linares — Professor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

Maxim M. Matyushin — Dr. (Technical Sciences), Mission Control Center (TSUP), Central Research Institute for Machine Building (TsNIIMash), State Space Corporation "Roscosmos", Korolev, Russian Federation

Andrey V. Medvedev — Dr. (Physical and Mathematical Sciences), corresponding member of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

Arun Misra — Professor, McGill University, Montreal, Canada

Seidu O. Mohammed — Professor, National Space Research and Development Agency, Abuja, Nigeria

Daniele Mortari — Professor, Texas A&M University, College Station, USA

Giovanni Palmerini — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Vyacheslav G. Petukhov — Dr. (Technical Sciences), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Yury S. Popkov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Institute for Systems Analysis, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Harri A. Popov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Antonio Prado — Professor, National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brazil

Ivan Y. Redko — Dr. (Technical Sciences), Professor, Krzhizhanovsky Energy Institute, Moscow, Russian Federation

David B. Spencer — Professor, Pennsylvania State University, University Park, USA

Renuganth Varatharajoo — Professor, University Putra Malaysia, Seri Kembangan, Malaysia

Massimiliano L. Vasile — Professor, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

Antonio Viviani — Professor, University of Campania "Luigi Vanvitelli", Naples, Italy


Tetsuo Yasaka — Professor Emeritus, Kyushu University, Fukuoka, Japan

RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

Published by the Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University)

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Publication frequency: quarterly.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access) 

Languages: Russian, English.

Indexed by White List of RCSI, Russian Index of Science Citation, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, Dimensions, ResearchBib, Lens, Research4Life, JournalTOCs, British Library, Bodleian Libraries (University of Oxford), Ghent University Library.

Aims and Scope

The RUDN Journal of Engineering Research — is a peer-reviewed international academic journal publishing research in the field of aviation and space technology, mechanical engineering. The journal is international in terms of the composition of the editorial board, authors and topics of publications. The journal publishes the results of original scientific research by Russian and foreign scientists.

The aims of the journal:

- assistance in the development of Russian and foreign engineering schools;
- promotion and implementation into practice of modern advanced technologies in these areas;
- scientific exchange and collaboration between scientists.

The journal is addressed to researchers, engineers, graduate students. Included in the List of the Leading Scientific Journals and Editions of the Highest Certification Committee of the Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral theses are to be published.

The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> and contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

Editorial Board strictly adheres to the international standards of publication ethics of the COPE:

<http://publicationethics.org>

Copy Editor *I.L. Pankratova*
English Texts' Editor *A.S. Korzin, E.F. Shaleeva, N.A. Alekseeva*
Layout Designer *N.V. Markelova*

Address of the editorial board:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Address of the editorial board of RUDN Journal of Engineering Research:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Mityagin D.O., Koronov A.A., Agasieva S.V. Visualization of the Agglomeration Process of Copper Particles Used in the Manufacture of Current-Carrying Cells of Lithium-Ion Batteries (Визуализация процесса агломерации частиц меди, используемых при изготовлении токосъемных элементов литий-ионных аккумуляторов)	7
Паначев А.А. Идентификация и управление экономическими системами с применением сетевого эффекта	15
Rogachev D.A., Rogachev A.F. Modification of the Structure and Parameters of Genetic Algorithms with Fuzzy Operators Implemented by Hybrid Controllers (Модификация структуры и параметров генетических алгоритмов с нечеткими операторами, реализуемых гибридными контроллерами)	25
Трофимец Е.Н., Селеменова Т.А. Автоматизация инженерных расчетов в системе информационно-аналитической подготовки специалистов техносферной безопасности	37
Маликов Е.А., Талла Фонганг Т.П., Пьянков В.В. Интеграция технологий блокчейн в процессы оптимизации управленческих решений в организационных системах ОПК	49
Al Hakim R.S., Kovaleva E.A., Andreeva L.O., Bogacheva T.V. Improving the Efficiency of Distance Learning with a Minimum Network Load (Повышение эффективности дистанционного обучения при минимальной нагрузке на сеть)	61
Kruglova L.V., Ceessay F.K., Samb R. Factors Influencing the Formation of Augmented Reality Systems (Факторы, влияющие на формирование систем дополненной реальности)	70
Орешкин А.В., Жульков А.С., Сидоров С.Н., Поленов Д.Ю. Исследование точностных параметров волоконно-оптического гироскопа для малогабаритного инерциального измерительного блока	81
Дейнова К.Б., Малькова М.Ю., Азанов М.В., Задиранов А.Н., Азанов А.В., Сагадеев Р.А. Снижение стоимости и повышение доступности резьбовых фиксаторов крепежных деталей без потери качества и надежности стопорения	93
Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н., Якупов Н.М., Низамова Г.Х. Коррозионный износ тонкостенных элементов конструкций под воздействием магнитного поля	109
Pham N.T. Advances and Future Directions in Floating Buoy Technology for Marine Energy and Environmental Applications (Передовые разработки и перспективы применения плавучих буев в морской энергетике и экологическом мониторинге)	122

CONTENTS

Mityagin D.O., Koronov A.A., Agasieva S.V. Visualization of the Agglomeration Process of Copper Particles Used in the Manufacture of Current-Carrying Cells of Lithium-Ion Batteries	7
Panachev A.A. Identification and Management of Economic Systems with Network Effects	15
Rogachev D.A., Rogachev A.F. Modification of the Structure and Parameters of Genetic Algorithms with Fuzzy Operators Implemented by Hybrid Controllers	25
Trofimets E.N., Selemeneva T.A. Automation of Engineering Calculations in an Information and Analytical Training System for Technosphere Safety Specialists	37
Malikov E.A., Talla Fongang T.P., Pyankov V.V. Integration of Blockchain Technologies into Managerial Decision-Making Optimization in Organizational Systems of the Defense Sector	49
Al Hakim R.S., Kovaleva E.A., Andreeva L.O., Bogacheva T.V. Improving the Efficiency of Distance Learning with a Minimum Network Load	61
Kruglova L.V., Ceesay F.K., Samb R. Factors Influencing the Formation of Augmented Reality Systems ...	70
Oreshkin A.V., Zhulkov A.S., Sidorov S.N., Polenov D.Yu. Investigation of the Accuracy Parameters of a Fiber-Optic Gyroscope for a Small-Sized Inertial Measuring Unit	81
Deynova K.B., Malkova M.Yu., Azanov M.V., Zadiranov A.N., Azanov A.V., Sagadeev R.A. Reducing the Cost and Improving the Availability of Thread-Locking Compounds Without Compromising Quality and Locking Reliability	93
Giniyatullin R.R., Yakupov S.N., Yakupov N.M., Nizamova G.Kh. Corrosion Wear of Thin-Walled Structural Elements Under Magnetic Field Exposure	109
Pham N.T. Advances and Future Directions in Floating Buoy Technology for Marine Energy and Environmental Applications	122



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-7-14

EDN: GUXRGV

Research article / Научная статья

Visualization of the Agglomeration Process of Copper Particles Used in the Manufacture of Current-Carrying Cells of Lithium-Ion Batteries

Daniil O. Mityagin^{a,b}✉, Alexey A. Koronov^b, Svetlana V. Agasieva^b

^a MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

^b RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ Mityagin.danya@gmail.com

Article history

Received: September 10, 2025

Revised: November 10, 2025

Accepted: November 15, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The present study aims to conduct a comparative analysis of dispersion media used for the synthesis and storage of copper nanoparticles derived from copper formate, and to evaluate their suitability for application in current collectors. Particle characteristics in two media, namely ethyl alcohol and a mixture of alcohol and ethylene glycol, were investigated using dynamic light scattering, rheological analysis, and refractometry. The results demonstrate that the combined solvent system produces nanoparticles with a smaller average diameter (56.7 nm compared to 107.1 nm in pure alcohol) and a narrower size distribution, with 83.4% of particles falling within the 64–128 nm range. To visualise the data, particle size histograms were constructed, and the distributions were approximated using normal and Pearson distribution models. Experimental findings further indicate that the rate of particle agglomeration in the alcohol — ethylene glycol medium is approximately two times lower than in pure alcohol. On the basis of these results, the alcohol — ethylene glycol mixture can be recommended as a stabilising dispersion medium for the long-term storage of copper nanodispersions intended for use in current collector applications.

Keywords: lithium-ion battery, current collectors, copper nanoparticle dispersion, agglomeration, dynamic light scattering, normal distribution, Pearson distribution

Authors' contribution

Mityagin D.O. — experiment conducting, data processing, working with distribution, writing; Koronov A.A. — data processing, visualization; Agasieva S.V. — data processing. All authors read and approved the final version of the article.

For citation:

Mityagin DO, Koronov AA, Agasieva SV. Visualization of the agglomeration process of copper particles used in the manufacture of current-carrying cells of lithium-ion batteries. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):7–14. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-7-14> EDN: GUXRGV



Визуализация процесса агломерации частиц меди, используемых при изготовлении токосъемных элементов литий-ионных аккумуляторов

Д.О. Митягин^{a,b}✉, А.А. Короннов^b, С.В. Агасиева^b

^a МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

^b Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ Mityagin.danya@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 10 сентября 2025 г.

Доработана: 10 ноября 2025 г.

Принята к публикации: 15 ноября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Цель исследования — сравнительный анализ дисперсионных сред для синтеза и хранения наночастиц меди, получаемых из формата меди, с последующей оценкой их пригодности для использования в токосъемниках. Посредством применения методов динамического светорассеяния, реологии и рефрактометрии изучены характеристики частиц в средах «этиловый спирт» и «спирт + этиленгликоль». Показано, что использование комбинированной среды позволяет получать частицы с меньшим средним размером (56,7 нм против 107,1 нм) и более узким распределением (83,4 % частиц в диапазоне 64–128 нм). Для визуализации данных построены гистограммы и аппроксимированы законы распределения (нормальное и Пирсона). Экспериментально установлено, что скорость агломерации частиц в среде «спирт + этиленгликоль» в 2 раза ниже, чем в чистом спирте. На основании результатов сделан вывод о целесообразности применения смеси спирта с этиленгликолем в качестве стабилизирующей среды для долговременного хранения медной нанодисперсии.

Ключевые слова: системы накопления энергии, токосъемники, нанодисперсия меди, динамическое светорассеяние, нормальное распределение, распределение Пирсона, регрессия

Вклад авторов

Митягин Д.О. — проведение эксперимента, обработка данных, работа с распределением, написание текста; *Короннов А.А.* — обработка данных, визуализация; *Агасиева С.В.* — обработка данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Митягин Д.О., Короннов А.А., Агасиева С.В. Визуализация процесса агломерации частиц меди, используемых при изготовлении токосъемных элементов литий-ионных аккумуляторов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 7–14. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-7-14> EDN: GUXRGV

Introduction

The rapid pace of industrial development necessitates accelerated growth in the energy sector. Modern information technologies are associated with substantial electricity consumption. Advanced approaches are therefore being employed to design highly efficient energy devices [1; 2]. At the same time, in addition to achieving high efficiency, it is essential to ensure the reliability of power systems and electrical equipment [3; 4]. The future utilization

of available energy resources largely depends on the advancement of efficient energy storage systems. Currently, conventional methods for storing electricity generated by stationary power plants are complemented by a range of emerging technologies [5].

Ensuring the mobility of individual electric transport requires the development of batteries capable of storing sufficient energy for extended travel distances [6]. Existing market solutions can largely be regarded as interim measures. From a

contemporary standpoint, lithium-ion batteries represent the most promising technology for electrical energy storage. Numerous approaches focus on improving battery performance by modifying the electrochemical properties of the cathode material. In contrast, considerably less attention has been devoted to current collectors, which provide contact with the electrical network. A substantial portion of energy losses occurs during current collection, making this issue particularly significant in the operation of energy storage devices. One potential approach to reducing such losses is the use of highly dispersed copper in the manufacture of current collectors. Copper is characterized by high electrical conductivity, stable performance over a wide temperature range, and diamagnetic properties, which help minimize interference from electromagnetic fields during current collection. However, the properties of copper nanoparticles largely depend on the synthesis method employed. A key challenge in selecting an appropriate method lies in the limited understanding of the feasibility of obtaining particles of different sizes through dispersion-based synthesis techniques. This study seeks to predict the formation of particles of specific sizes produced via the synthesis of nanodispersions from copper formate and to visualize their agglomeration over time during storage.

1. Objective and Problem Statement

The objective of this study is to visualise the processes involved in the synthesis of highly dispersed copper particles from copper formate and their subsequent agglomeration, as well as to determine the theoretical size distribution of particles formed in different media. Such visualisation is necessary to assess the feasibility of using particles produced by this method in the manufacture of current collectors for lithium-ion batteries, based on their size characteristics.

To achieve this objective, the following tasks were undertaken:

1. To synthesise copper nanoparticles from copper formate in two media: ethyl alcohol and a mixture of ethyl alcohol and ethylene glycol;

2. To measure and compare particle sizes and their distributions in both media using dynamic light scattering;

3. To visualise particle size distributions by constructing histograms and fitting theoretical models (normal and Pearson distributions) to the experimental data;

4. To investigate the kinetics of copper particle agglomeration in both media over a 24-hour period;

5. To evaluate the stability of the resulting nanodispersions and assess the practical prospects of each medium based on the obtained results.

2. Theoretical Analysis

Key Challenges Associated with Current Collectors

The principal characteristics governing the current collection process are reliability, cost-effectiveness, and energy efficiency. Reliability implies the absence of damage to both the current collectors and the electrical network that could lead to device failure. From the perspective of cost-effectiveness, various manufacturing technologies incorporating advanced materials may be considered. The use of novel materials can extend the service life of the device while reducing production costs. The energy efficiency of current collection is determined by the properties of the current collector itself, particularly the material composition and the contact surface area.

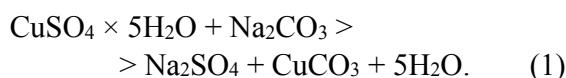
The primary losses in the current collection process arise from incomplete contact with the electrical network, which is largely determined by the manufacturing characteristics of the current collector. First, materials with high electrical conductivity must be employed. Second, electrical energy transmission should be uniform across the entire contact surface. These requirements necessitate the use of dispersed material compositions [7; 8]. The small particle size ensures a high contact density, thereby reducing electrical losses during current collection [8–10]. A distinctive aspect of copper nanoparticle production is the ability to obtain particles up to 200 nm in size from

virtually any copper salt precursor. This flexibility enables the selection of synthesis methods based on the cost of source materials, resulting in significant economic advantages for the overall technological process. At the same time, challenges remain in the storage and transportation of copper nanoparticles due to their tendency to agglomerate [11–13].

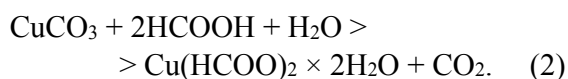
3. Experiment Procedure

3.1. Method of Production

In this study, copper formate was employed as the precursor for the synthesis of copper nanoparticles [14]. One of the key reagents used in the preparation of copper formate is copper carbonate, which can be obtained by reacting an aqueous solution of copper sulfate pentahydrate ($\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$) with an aqueous solution of sodium carbonate (Na_2CO_3). Equal volumes (50 ml) of the prepared solutions were mixed and subsequently placed in an ultrasonic bath to promote the reaction. The reaction between these components proceeds as follows:



The reaction yields copper carbonate, sodium sulfate, and water. To isolate the desired copper carbonate, the reaction mixture is filtered to remove sodium sulfate. Filtration is carried out using a Büchner funnel. Following filtration, concentrated formic acid is added portionwise to the copper carbonate with continuous stirring. The resulting mixture is then placed in an ultrasonic bath to ensure thorough mixing of the components. This reaction leads to the formation of blue copper formate:



The resulting formate is added to various media in order to prevent particle agglomeration. In this work, ethyl alcohol and a mixture of ethyl alcohol and ethylene glycol will be used as the media.

3.2. Method for Measuring Particle Size

Particle size measurements were carried out using the dynamic light scattering method with a Zetasizer Nano ZS spectrometer (Malvern Instruments). Solvent viscosity was determined by rotational rheometry using a Kinexus Pro rheometer. The refractive index was measured with an IRF-454B2M refractometer. The measured solvent parameters are presented in Table.

Solvent indicators

Solvent	Refractive index	Viscosity, MPa*s, at 25°C
Alcohol + ethylene glycol (anhydrous)	1.137	4.5
Alcohol	1.360	1.096

Source: by D.O. Mityagin, A.A. Koronov.

4. Results and Discussion

The prepared copper formate sample was introduced into ethyl alcohol at a concentration of 0.25 g per 100 ml. Particle size measurements were conducted in this solution at a temperature of 15°C using the dynamic light scattering method. Each experiment was repeated at least five times to verify the measured particle size and to confirm the absence of agglomeration at the initial stage. The results indicate that this synthesis method predominantly produces copper particles with an average size of 107.1 nm. However, the resulting dispersion is not stable, as the presence of larger particles is observed. In the second experiment, a mixture of ethyl alcohol and ethylene glycol was used as the dispersion medium. Following the change of medium, the particle size remained within a comparable range; however, repeated measurements revealed no signs of agglomeration. In this case, the predominant particle size was 56.7 nm, which makes these particles suitable for potential application in the manufacture of current collectors. On this basis, it can be concluded that this medium is more appropriate for storing the resulting nanodispersion. The measurement results are presented in the combined graph in Figure 1.

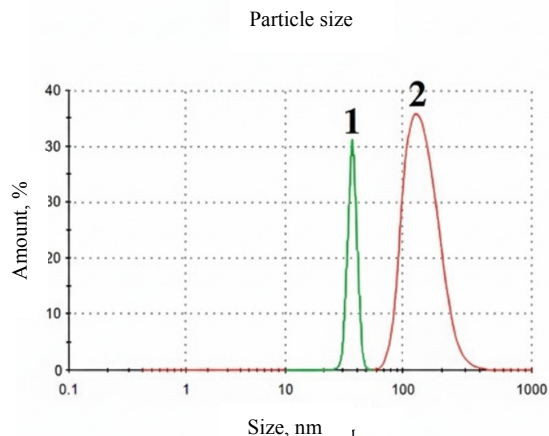


Figure 1. Measurement results using the Zetasizer instrument for two experiments:
 1— copper in the “alcohol + ethylene glycol” medium;
 2— copper in the “alcohol” medium
 Source: by D.O. Mityagin, A.A. Koronnov.

Visualisation of the Distribution. For clarity, the experimental results are visualised [15; 16]. The data obtained from the graphs are processed to determine the percentage contribution of particles of different sizes to the total particle population. For this purpose, 20 data points are selected from

each graph, and the proportion of particles corresponding to each measured size is calculated.

Histograms were constructed for both media to illustrate the particle size distributions. The data were grouped into class intervals (Figures 2 and 3): an interval width of 80 nm was selected for the alcohol medium, and 32 nm for the alcohol — ethylene glycol mixture. The histograms were then generated based on these grouped data. To further characterise the distributions, theoretical distribution functions were fitted in order to estimate the probability of occurrence of particles of different sizes. By truncating the dataset above 300 nm, attention can be focused on the central portion of the histogram, where a pronounced peak is observed. This feature justifies the use of a Gaussian distribution model for copper particles dispersed in alcohol. At the same time, the presence of an additional peak at lower particle sizes suggests the applicability of an alternative distribution function. For this type of data, the Pearson distribution was employed. The necessary parameters for both functions were calculated, and the corresponding curves were plotted.

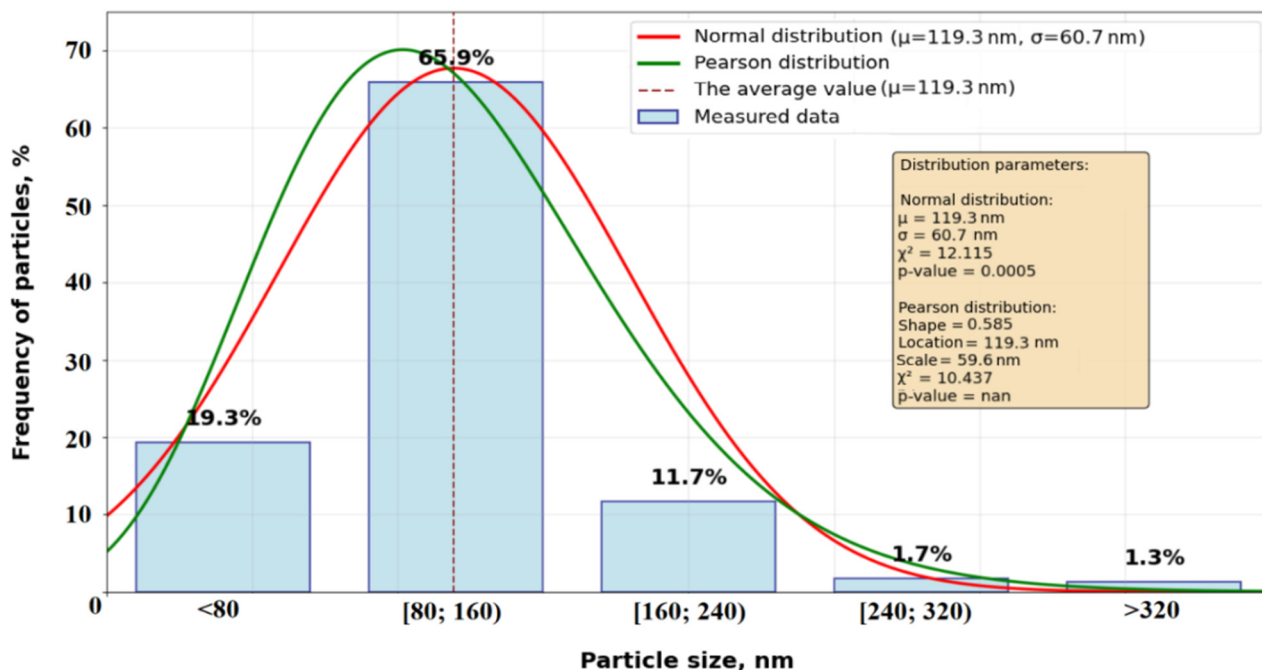


Figure 2. Gaussian distribution and Pearson distribution for particles in alcohol
 Source: by D.O. Mityagin, A.A. Koronnov.

Based on the obtained distribution, it can be concluded that 65.9% of the particles fall within the size range of 80–160 nm. At the same time, the formation of larger particles in the dispersion is observed, which limits its suitability for the manufacture of current collectors. The presence of large particles in the subsequent thermal decomposition of copper formate would result in a reduced contact

area and, consequently, increased energy losses during current collection.

Examination of the histogram for the “alcohol + ethylene glycol” medium reveals a pronounced peak at lower particle sizes followed by a gradual decline. After calculating the required parameters for the selected distribution function, the particle size distribution in the solution was plotted.

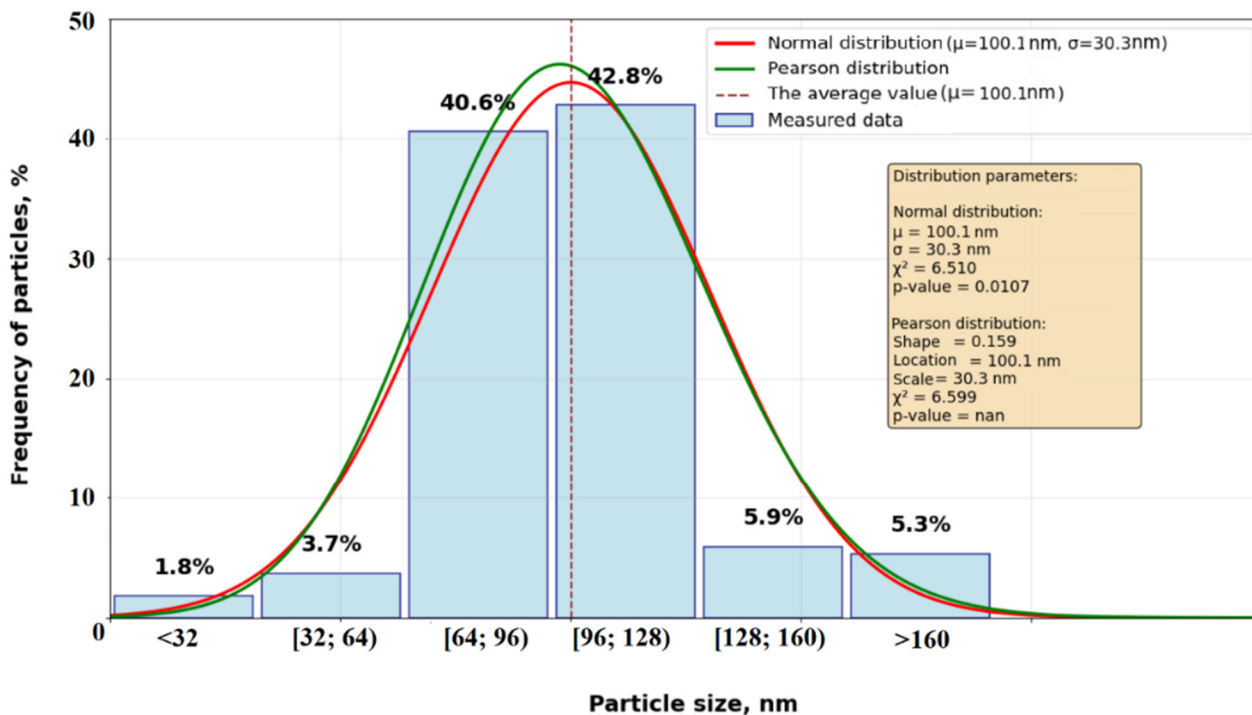


Figure 3. Gaussian and Pearson distributions for particles in a mixture of alcohol and ethylene glycol

Source: by D.O. Mityagin, A.A. Koronov.

Based on the obtained distribution, it can be concluded that the majority of particles (83.4%) fall within the size range of 64–128 nm. The use of this medium therefore enables the production of particles suitable for the manufacture of current collectors. However, the presence of larger particles indicates a potential reduction in effective contact area. In this case, preliminary filtration may be applied, provided that the stability of the dispersion is maintained.

Over time, copper particles were observed to undergo agglomeration. Particle size measurements were performed every four hours over a 24-hour

period. During this interval, the average particle size in the “alcohol” medium increased by a factor of 4.6, whereas in the “alcohol + ethylene glycol” medium it increased by 2.4 times. These results indicate that the alcohol — ethylene glycol mixture provides more favourable conditions for storing copper nanodispersions, as particle agglomeration proceeds at a slower rate.

The agglomeration process of copper particles over time in different media is illustrated below (Figure 4).

Analysis of the graph indicates that nanoparticles dispersed in pure alcohol exhibit low

stability. As a result, the use of this nanodispersion is associated with material losses not only during filtration but also due to ongoing agglomeration, since the presence of enlarged particles negatively affects performance in the manufacture of current collectors.

In contrast, nanoparticles in the “alcohol + ethylene glycol” medium demonstrate a slower rate of agglomeration. This improved stability makes it possible to retain the required parameters for current collector fabrication even after extended storage of the nanodispersion.

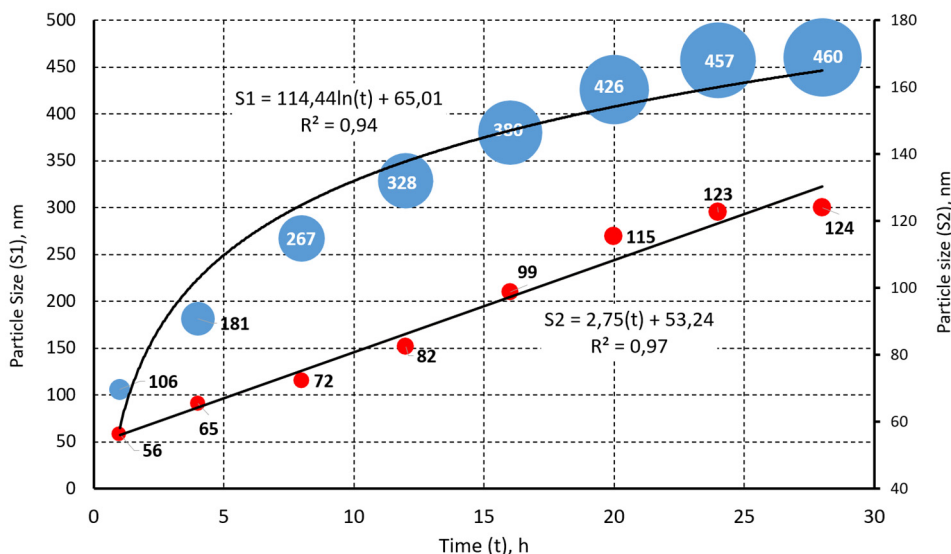


Figure 4. Copper agglomeration. S1 is the particle size in the “alcohol” medium, S2 is the particle size in the “alcohol + ethylene glycol” medium

Source: by D.O. Mityagin, A.A. Koronnov.

Conclusion

The study identifies the principal relationships describing the size distribution of copper particles in alcohol and in an alcohol — ethylene glycol medium, and examines the agglomeration process over a 24-hour period following synthesis. Histograms were constructed to characterise the particle size distribution and the proportion of particles of different sizes in each solution. In the alcohol medium, particles with an average size of approximately 107.1 nm are predominantly formed. In contrast, the alcohol — ethylene glycol medium yields smaller particles, with an average size of approximately 56.7 nm. The alcohol — ethylene glycol system demonstrates greater stability, as evidenced by a narrower particle size distribution (83.4% of particles within the 64–128 nm range). In pure alcohol, the distribution is broader (65.9% of particles within the 80–160 nm range), and

larger particles are present that are unsuitable for practical application. Based on the results obtained, conclusions were drawn regarding the selection of dispersion media for producing copper particles of specific sizes, as well as for the storage of copper nanodispersions and their subsequent use.

References

1. Monakov Y, Tarasov A, Ivannikov A, Murzintsev A, Shutenko N. Optimization of equipment operation in power systems based on the use in the design of frequency-dependent models. *Energies*. 2023;16(18):6756. <https://doi.org/10.3390/en16186756> EDN: UFOGNT
2. Bulatov Y, Kryukov A, Suslov K. Innovative Technologies for controlling modes of power supply systems using renewable energy sources. In: Lazaroiu G.C., Roscia M., Dancu V.S. (eds.) *Energy transition holistic impact challenge (ETHIC): A new environmental and climatic era. Environmental science and engineering*. Springer Publ.; 2024. p. 299–344. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55448-3_13

3. Kaliberda IV. On the regulatory and legal support of electrical safety at electric power facilities and power receivers. *Occupational Safety in Industry*. 2025;(7):26–31. (In Russ.) EDN: AQFOSC
4. Trofimov VB, Temkin IO, Solodov SV. Application of case-based reasoning in hazard evaluation in complex process flow control. *Eurasian Mining*. 2023;40(2):41–46. <http://doi.org/10.17580/em.2023.02.09> EDN: GWVUIJ
5. Filina OA. Analyzing electrical safety in electrical grids of industrial enterprises. *Occupational Safety in Industry*. 2025;(6):78–84. (In Russ.) <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2025-6-78-84> EDN: RHDUWH
6. Khekert EV, Malozyomov BV, Klyuev RV, Martyshev NV, Konyukhov VY, Kukartsev VV, Antamoshkin OA, Remezov IS. Battery charging simulation of a passenger electric vehicle from a traction voltage inverter with an integrated charger. *World Electric Vehicle Journal*. 2025;16(7):391. <https://doi.org/10.3390/wevj16070391>
7. Sharma V, Basak S, Ali SW. Synthesis of copper nanoparticles on cellulosic fabrics and evaluation of their multifunctional performances. *Cellulose*. 2022;29:7973–7988. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04709-0> EDN: OMJYEF
8. Nasrollahzadeh M, Momeni SS, Sajadi SM. Green synthesis of copper nanoparticles using *Plantago asiatica* leaf extract and their application for the cyanation of aldehydes using $K_4Fe(CN)_6$. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2017;506:471–477. <http://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.072>
9. Yuan H, Liu J, Lu Y, Zhao C, Cheng X, Nan H, Liu Q, Huang J, Zhang Q. Toward Practical all-solid-state batteries with sulfide electrolyte: A Review. *Chemical Research in Chinese Universities*. 2020;36(3):377–385. <http://doi.org/10.1007/s40242-020-0103-5>
10. Jia H, Xu W. Electrolytes for high-voltage lithium batteries. *Trends in Chemistry*. 2022;4(7):627–642. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2022.04.010> EDN: ZANDKB
11. Wang X. Advanced materials for lithium-ion batteries and modification strategies in elimination of lithium dendrite. Highlights in Science. *Engineering and Technology*. 2022;17:30–37. <https://doi.org/10.54097/hset.v17i.2433>
12. Scrosati B, Abraham KM, Van Schalkwijk W, Hassoun J. *Lithium Batteries: Advanced Technologies and Applications*. John Wiley & Sons, Inc.; 2013. <http://doi.org/10.1002/9781118615515>
13. Shi Q, Lu Ch, Cao Y, Hao Y, Bachmatiuke A, Rummeli MH. Recent developments in current collectors for lithium metal anodes. *Materials Chemistry Frontiers*. 2023;7:1298–1311. <https://doi.org/10.1039/D3QM00029J> EDN: UITPYE
14. Ghosh S, Bhattacharjee U, Bhowmik S, Martha SK. A review on high-capacity and high-voltage cathodes for next-generation lithium-ion batteries. *Journal of Energy and Power Technology*. 2022;1(1):002. <http://doi.org/10.21926/jept.2201002>
15. Maksimenko LA. Regulatory aspects and practical approaches to data visualization. *Scientific Visualization*. 2024;16(4):120–128. (In Russ.) <http://doi.org/10.26583/sv.16.4.11> EDN: UIHIEV
16. Saveleva EO, Savelev IL, Ivannikov AL, Solodov SV. Prospects of virtual and augmented reality technology integration into intelligent occupational safety management systems. *Occupational Safety in Industry*. 2025;(8):58–63. (In Russ.) EDN: DWWOOL

About the authors

Daniil O. Mityagin, Postgraduate student of the Department of Nanotechnology and Microsystems Engineering, Engineering Academy, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; Senior Lecturer at the Department of Physics and Technical Mechanics at the Institute of Applied Informatics and Industrial Programming of the Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation, 78 Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russian Federation; Senior Lecturer at the Department of Automated Control Systems, National University of Science and Technology MISIS, 4, bldg 1, Leninsky Prospekt, 119049, Moscow, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: ORCID: 0009-0004-1841-5922; e-mail: mityagin.danya@gmail.com

Alexey A. Koronnov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Engineering Academy, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9854-4380, ORCID: 0000-0001-6046-3400; e-mail: koronnov@inbox.ru

Svetlana V. Agasieva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9696-6864; ORCID: 0000-0002-9089-1411; e-mail: agasieva-sv@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-15-24
EDN: GVNCZE

Научная статья / Research article

Идентификация и управление экономическими системами с применением сетевого эффекта

А.А. Паначев

Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация
✉ panachev1@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 10 августа 2025 г.
Доработана: 21 октября 2025 г.
Принята к публикации: 30 октября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Исследование посвящено изучению эффективности управления экономическими системами. Обмениваясь коммуникациями, агенты образуют сеть, которая может быть представлена в виде двух контуров: разомкнутого (коммуникации с внешними агентами) и организационно-замкнутого (в пределах одной системы). Последний обеспечивает стабильность и по большей части не выделяется в качестве отдельного объекта исследования. Экономическая система динамична, количество связей и агентов в ней меняется с течением времени, а значит, может возникать сетевой эффект. Его важно учитывать при анализе эффективности системы. Цель — сформулировать технологию идентификации и управления организационно-замкнутыми экономическими системами с использованием сетевого эффекта. Технология представлена через цикл управления, включающий четыре этапа: сбор данных, анализ данных, генерация альтернатив и принятие решения. Для анализа эффективности системы рассчитывается сетевой эффект по двум аспектам: структурному и функциональному. Первый — показывает неаддитивность прироста количества связей при увеличении количества агентов, второй — рост внутреннего сбалансированного оборота. Технология применена на реальном экономическом субъекте. В результате было найдено 18 организационно-замкнутых экономических систем. Для расчета сетевого эффекта было смоделировано увеличение количества агентов в самой большой из найденных систем — 47 агентов. Расчеты наглядно показывают неаддитивное изменение показателей, что позволяет сделать вывод о наличии сетевого эффекта в системе.

Ключевые слова: сетевое сообщество, экономические системы, банковские транзакции, технология управления, сетевой эффект

Для цитирования

Паначев А.А. Идентификация и управление экономическими системами с применением сетевого эффекта // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 15–24. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-15-24> EDN: GVNCZE

© Паначев А.А., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Identification and Management of Economic Systems with Network Effects

Anton A. Panachev^{ORCID}

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, *Ekaterinburg, Russian Federation*

✉ panachev1@mail.ru

Article history

Received: August 10, 2025.

Revised: October 21, 2025

Accepted: October 30, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. This study investigates the effectiveness of economic system management from a network perspective. Through ongoing communication, agents form networks that can be described in terms of two contours: an open contour, reflecting interactions with external agents, and an organisationally closed contour, confined to interactions within a single system. The latter contributes to system stability, yet it is rarely examined as an independent object of analysis. Economic systems are inherently dynamic: the number of agents and the connections among them change over time. As these changes occur, network effects may emerge, influencing overall system performance. Recognising and accounting for such effects is therefore essential when assessing managerial effectiveness. The study aims to develop a practical framework for identifying and managing organisationally closed economic systems based on network effects. This framework is structured as a management cycle comprising four stages: data collection, data analysis, generation of alternatives, and decision-making. System effectiveness is evaluated through two dimensions of the network effect: structural and functional. The structural dimension captures the non-additive growth in the number of connections as the number of agents increases. The functional dimension reflects the expansion of internally balanced turnover within the system. The proposed framework was applied to an actual economic entity, resulting in the identification of 18 organisationally closed economic systems. To assess the presence of a network effect, the study modelled an increase in the number of agents within the largest identified system (47 agents). The results demonstrate a clearly non-additive change in key indicators, confirming the existence of a network effect within the system.

Keywords: network society, economic systems, banking transactions, technology of management, network effect

For citation

Panachev AA. Identification and Management of Economic Systems with Network Effects. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):15–24. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-15-24> EDN: GVNCE

Введение

Вопрос эффективного управления системами исследуется с момента появления самого понятия «система», описывающего единство связанных друг с другом предметов, явлений и знаний [1]. Изначально люди объединялись в организационные системы для совместного создания продукта, обладающего добавленной стоимостью. Со временем организации усложнялись, увеличивалось как количество людей, задействованных в задаче, так и процессы. Появилось понятие «экономическая система» – совокупность экономических процессов, от производства до распределения конечного продукта до потребителя [2].

Экономическая система может быть представлена в виде графа, где каждый элемент может быть представлен в виде узла (агента), которыми могут выступать организации, подразделения, агенты. Агенты обмениваются ресурсами (коммуникациями) следующих классов [3; 4]:

- финансовые (денежные средства);
- энергетические (нефть, газ, биотопливо и пр.);
- материальные (машины, станки, земля и пр.);
- информационные (данные, информация);
- трудовые (люди).

Наряду с экономическими системами активно развивалось понятие «сетевое общество»,

впервые упомянутое Мануэлем Кастельсом [5] в период, когда активно зарождался интернет (1950-е годы), где он также описывает коммуникации, которые выстраиваются между участниками электронных коммуникаций. Впоследствии направление стало активно исследоваться и появились такие определения, как:

- виртуальная организация [6];
- сетевое предприятие, сетевая организация [7];
- распределенная организация [8];
- виртуальная корпорация [9] и пр.

Все они описывают взаимодействие участников системы, которые направлены на создание общей ценности или выстраивание коммуникаций вокруг некоего объекта.

Обмениваясь коммуникациями внутри системы, агенты образуют более тесные связи, среди которых можно выделить разомкнутый и замкнутый контуры. Первый — описывает коммуникации с внешней средой и агентами, именно данный контур рассматривается в кибернетике первого порядка. Замкнутый — коммуникации агентов внутри системы, которые происходят на регулярной основе и не выходят за ее пределы. Любая организационная система обладает и организационно-замкнутым и разомкнутым контурами.

Замкнутый контур также рассматривался также Умберто Матурана и Франсиско Варела в работе «Все сказанное сказано наблюдателем» [10], где они проводят параллель между замкнутым и разомкнутым контурами, формулируя мысль о том, что главной целью замкнутого контура организационной системы является поддержание стабильности системы, а разомкнутого — развитие (в контексте экономических систем — получение прибыли). Аутопоэз рассматривается как ответвление кибернетики второго порядка, сформулированного Хейнцем фон Фёрстером [11], который в своих работах [12] также подчеркивает наличие собственного поведения внутри систем (замкнутого контура).

Понятие «сетевые организации», как и «экономические системы», исследуются более 50 лет, но в работах не уделяется достаточного

внимания замкнутому контуру, который зачастую не выделяется в качестве отдельного объекта исследования.

Рассматривая систему в динамике, можно отметить, что количество агентов и связей между ними не статично, эффективность может меняться, иногда возникает сетевой эффект. Феномен сетевого эффекта описывает ценность, которая извлекается из товара, услуги, растет нелинейно и зависит от количества участников системы. При управлении организационной системой для принятия управленческого решения важно анализировать сетевой эффект, что позволит получить максимальную выгоду.

В рамках данной работы сформулирована технология идентификации и управления организационно-замкнутыми экономическими системами с использованием сетевого эффекта.

1. Методика

В качестве отправной точки для построения технологии идентификации и управления организационно-замкнутыми экономическими системами было принято решение взять цикл управления (рис. 1).



Рис. 1. Цикл управления
Источник: выполнено А.А. Паначевым
Figure 1. Cycle of management
Source: by A.A. Panachev

Каждый из четырех представленных шагов представляет собой обязательный этап в решении задачи управления.

Первый шаг — сбор данных. Данные могут быть собраны различными инструментами, от экспертных опросов до работы с базами данных. В рамках текущего исследования был написан алгоритм на языке Python, который позволяет работать с базами данных. В качестве агентов исследуемой организационно-замкнутой системы были выбраны организации. Банковские транзакции — один из наиболее показательных источников информации о движении коммуникаций между организациями, дальнейшая работа происходила с ними. Для старта движка требуется экспортировать файл со следующими атрибутами:

- 1) плательщик (наименование организации);
- 2) получатель (наименование организации);
- 3) сумма, руб.;
- 4) дата платежа.

Среди наиболее эффективных инструментов для идентификации организационно-замкнутых систем и работы с графами можно выделить следующие группы методик:

- 1) методы нахождения кратчайшего пути: алгоритм Дейкстры [13]; алгоритм A-star (A*) [14]; транспортная задача [15];

- 2) методы обхода графов: поиск в ширину (Breadth-first-search) [16; 17]; поиск в глубину (Depth-first-search) [18–21].

Специфичной задачей данного исследования является поиск именно организационно-замкнутых систем, где все организации-участники связаны между собой коммуникациями, а сами транзакции возвращаются к первоначальному плательщику, с которого цепочка транзакций началась. Для написания данного алгоритма были использованы подходы алгоритмов Дейкстры и поиска в ширину, где первый позволяет сформировать множество потенциальных вершин (агенты, которые и платят, и получают), а второй — найти промежуточных плательщиков в цепи транзакций. Подробно схема и алгоритм приведены в работе [22].

В упрощенном виде пошаговый алгоритм идентификации организационно-замкнутых систем представлен на рис. 2, а подробное описание — в [22].

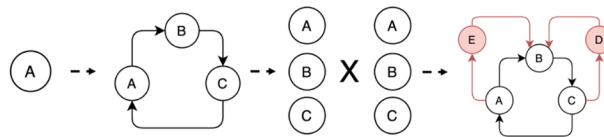


Рис. 2. Алгоритм идентификации сетевых организационно-замкнутых систем
Источник: выполнено А.А. Паначевым.

Figure 2. Algorithm of network organizationally closed systems identification
Source: by A.A. Panachev.

Алгоритм Дейкстры позволяет идентифицировать вершину «А» (одновременно платит и получает транзакции). Далее подключается алгоритм поиска в ширину и находит первую замкнутую цепочку «А–В–С», на следующем этапе необходимо найти все промежуточные транзакции. Для этого необходимо определить все комбинации из трех агентов (А–А, А–В, В–С и т.д.) и поискать транзакции между ними. При нахождении новых агентов система снова ищет все доступные комбинации, и так до тех пор, пока новые участники не будут установлены.

Перед написанием алгоритма были проанализированы наиболее близкие из существующих прикладных решений. Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 1.

Наиболее близкий прикладной алгоритм для решения задачи поиска организационно-замкнутых систем — О.М. Зверевой, но он работает эффективно для небольших выборок данных, ввиду низкой скорости их обработки. Авторский алгоритм быстрее за счет подходов Дейкстры, что позволяет обрабатывать большие массивы информации.

На этапе генерации альтернатив происходит расчет будущего прогнозного результата по нескольким стратегиям (пример: присоединение новых агентов к системе, субсидирование убыточных предприятий и пр.). Среди наиболее подходящих инструментов для расчета потенциального влияния на систему можно выделить имитационное моделирование [25]. В рамках другой работы [26] была сформулирована и применена гибридная имитационная модель, включающая системно-динамическую и агент-ориентированную части, но она не является предметом данного исследования.

Таблица 1. Сравнение прикладных алгоритмов идентификации сетевых организационно-замкнутых систем

Автор	Показатель	Значение
Зверева О.М. [23]	Алгоритм идентификации	Поиск в глубину (обход ребер и фиксация при нахождении вершины)
	Метод	Автоматизированная обработка
	Направление поиска	От вершины по каждому из направлений до конца
	Предварительный поиск агентов	Нет
	Оптимизация	Нет
	Скорость обработки	Низкая
	Подходит для работы с большими массивами	Нет
Агарков Г.А. [24]	Алгоритм идентификации	Транспортная задача закрытого типа
	Метод	Ручное решение задачи
	Направление поиска	Матрица анализируется в комплексе
	Предварительный поиск агентов	Нет
	Оптимизация	Нет
	Скорость обработки	Очень низкая
	Подходит для работы с большими массивами	Нет
Паначев А.А.	Алгоритм идентификации	Синтез алгоритма Дейкстры и поиска в ширину (поиск от источника по ребрам) [22]
	Метод	Автоматизированная обработка
	Направление поиска	От вершины к границам
	Предварительный поиск агентов	Да
	Оптимизация	Да
	Скорость обработки	Высокая
	Подходит для работы с большими массивами	Да

Источники: выполнено А.А. Паначевым.

Table 1. Comparison of applied algorithms for identification of network organizational and closed systems

Author	Indicator	Value
Zvereva O.M. [23]	Identification algorithm	Depth-first search (traversing edges and fixing when a vertex is found)
	Method	Automated processing
	Search direction	From the top in each direction to the end
	Preliminary agent search	No
	Optimisation	No
	Processing speed	Low
	Suitable for working with large arrays	No
Agarkov G.A. [24]	Identification algorithm	A closed-type transport task
	Method	Manual problem solving
	Search direction	The matrix is analyzed in a complex way
	Preliminary agent search	No
	Optimisation	No
	Processing speed	Very low
	Suitable for working with large arrays	No
Panachev A.A.	Identification algorithm	Synthesis of Dijkstra's algorithm and breadth-first search (edge-first search)
	Method	Automated processing
	Search direction	From the top to the borders
	Preliminary agent search	Yes
	Optimisation	Yes
	Processing speed	High
	Suitable for working with large arrays	Yes

Source: by A.A. Panachev

Немаловажным аспектом для принятия решения является потенциальный сетевой эффект. Он позволяет добиться больших результатов с текущим уровнем трудозатрат. В рамках данной работы сетевой эффект рассчитывается по двум аспектам: структурному и функциональному.

Структурный аспект описывает влияние количества связей на количество агентов в системе и в общем виде рассчитывается по формуле (подробнее в статье [27]):

$$Ne = f(Nn), \quad (1)$$

где Ne — количество связей при заданном количестве агентов; Nn — количество агентов.

Функциональный аспект анализирует финансовые потоки внутри системы, в частности, он позволяет рассчитать внутренний сбалансированный оборот. Подробно методика расчета представлена в [28].

2. Результаты

Для апробации технологии были взяты транзакции между юридическими лицами за 1 месяц в городе с населением 80 тысяч человек в одном из банков. Количественные параметры выборки приведены в табл. 2.

Представленные организации работают в самых разных отраслях, от клининга до производства металлоконструкций. Наиболее распространенные представлены в табл. 3.

В результате применения авторского алгоритма идентификации было найдено 18 организационно-замкнутых экономических систем. Наиболее крупная из них состоит из 47 агентов (рис. 3).

Таблица 2. Количественные параметры выборки
Table 2. Quantitative sampling parameters

Наименование / Names	Значение / Value
Общий оборот, тыс. руб. / Total turnover, thousand rubles	2 706 526,95
Отрасли, шт. / Industries, pcs.	410
Компании, шт. / Companies, pcs.	2933
Транзакции, шт. / Transactions, pcs.	11791

Источник: выполнено А.А. Паначевым /
Source: by A.A. Panachev.

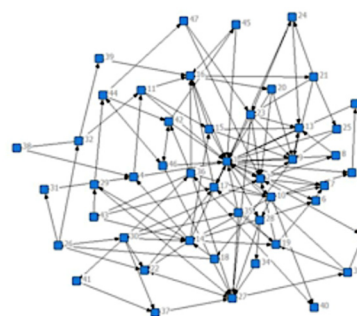


Рис. 3. Организационно-замкнутая экономическая система из 47 агентов
Источник: выполнено А.А. Паначевым.

Figure 3. Organisationally closed economic network which consists of 47 agents
Source: by A.A. Panachev.

Таблица 3. Топ-5 отраслей / Table 3. Top-5 industries

Наименование отрасли / Industry name	Организаций, шт. / Organizations, pcs.
Оптовая торговля, включая торговлю через агентов, кроме торговли автотранспортными средствами и мотоциклами / Wholesale trade, including trade through agents, except for trade in motor vehicles and motorcycles	361
Коммерческая организация / Commercial organisations	162
Прочая розничная торговля в неспециализированных магазинах / Other retail trade in non-specialized stores	94
Прочая оптовая торговля / Other wholesale trade	55
Торговля оптовая электрической бытовой техникой / Wholesale of electrical household appliances	53

Источник: выполнено А.А. Паначевым / Source: by A.A. Panachev.

На рис. 3 отражены только агенты внутри организационно-замкнутого контура, но следует отметить, что система не существует в вакууме и у большинства агентов есть связи с разомкнутым контуром. Сводные данные по системе в целом отражены в табл. 4.

Проанализировав полученные результаты, следует отметить, что лишь 3,5 % из всех организаций на территории муниципального образования входят в организационно-замкнутые экономические системы, при этом они обеспечивают 10,5 % от совокупного оборота.

Таблица 4. Сводная информация об организационно-замкнутых экономических системах на территории муниципалитета /

Table 4. Consolidated information on organizationally closed economic systems within the municipality

Наименование / Names	Вся выборка / The entire selection	Внутри организационно-замкнутых систем / Inside organizationally closed systems
Организаций, шт. / Organizations, pcs.	2 933	102 (18 систем)
Оборот, тыс. руб. / Turnover, thousand rubles	2 706 528	283 624
Транзакций, шт. / Transactions, pcs.	11 791	262

Источники: выполнено А.А. Паначевым / Source: by A.A. Panachev.

Как было отмечено ранее, сетевой эффект — это неаддитивный прирост структурных и функциональных показателей при увеличении количества агентов. Для расчета показателей сетевого эффекта была выбрана самая крупная система из 47 агентов, в которой выделено ядро из 14 агентов (рис. 4) и смоделировано пошаговое увеличение количества агентов до прежнего состояния.

Расчет сетевого эффекта производился по четырем точкам: начальной — 14 агентов; двум промежуточным — 26 и 31; конечной — 47.

Для анализа структурного эффекта брались реальные данные из системы — рассчитывалось количество связей на каждом из четырех шагов. Функциональный аспект, представленный через внутренний сбалансированный оборот, считался по сложной методике, подробно изложенной в [20]. Итоговые расчетные показатели приведены на рис. 5.

График наглядно иллюстрирует неаддитивное увеличение обоих показателей при добавлении агентов к системе, что свидетельствует о наличии сетевого эффекта как в структурном, так и функциональном аспекте.

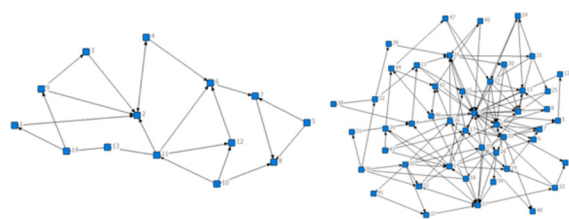


Рис. 4. Стартовое и конечное состояние организационно-замкнутой экономической системы из 47 агентов

Источники: выполнено А.А. Паначевым.

Figure 4. The initial and final state of an organisationally closed economic system consisting of 47 agents

Source: by A.A. Panachev.

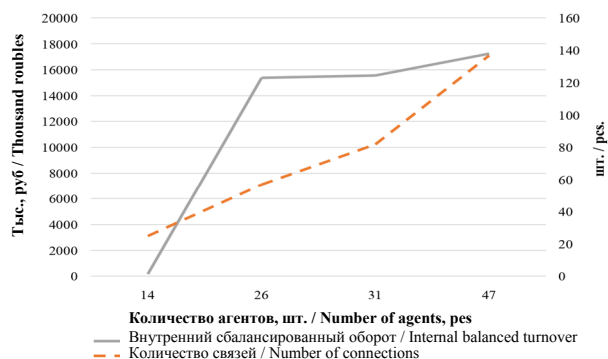


Рис. 5. Расчетные параметры для анализа сетевого эффекта

Источники: выполнено А.А. Паначевым.

Figure 5. Calculated parameters for network effect analysis

Source: by A.A. Panachev.

3. Дискуссия

Технология, представленная в статье, сфокусирована на исследовании организационно-замкнутых экономических систем через анализ банковских транзакций. Упор сделан на решении задачи через алгоритмы и программирование.

Для углубления результатов по исследуемой теме можно выделить два перспективных направления: данные и алгоритмы.

В исследовании рассмотрены только финансовые потоки между юридическими лицами, но в реальной экономике в цепочке участвуют еще и физические лица. Дополнительным аспектом является глубина данных. Выборка исследования — 1 месяц, что делает ее достаточной для решения задачи, но важно исследовать изменение метрик в динамике, а также влияние фактора сезонности.

В реальной экономике предприятия обмениваются следующими видами ресурсов: энергетическими, материальными, финансовыми; информационными; трудовыми. Представленный алгоритм позволяет обрабатывать только финансовые потоки (транзакции), что делает перспективным исследование и других типов ресурсов.

Заключение

В рамках данной работы сформулирована технология идентификации и управления организационно-замкнутыми экономическими системами с использованием сетевого эффекта, представленная через цикл управления из четырех шагов: сбор данных, идентификация, генерация альтернатив и принятие решений.

На каждом этапе представлены авторские наработки, которые впоследствии были применены на реальных данных о транзакциях, взятых из отделений банка муниципального образования.

В результате с помощью авторского алгоритма, написанного на языке Python, были найдены 18 организационно-замкнутых экономических систем.

Также было проанализировано наличие сетевого эффекта по двум аспектам на крупнейшей системе из 47 агентов и доказана неаддитивность изменения показателей при увеличении количества агентов, что подтверждает наличие сетевого эффекта.

Список литературы

1. Андрианов В.Д. Россия. Экономический и инвестиционный потенциал. Москва : Экономика, 1999. 662 с. ISBN 5-282-01957-4 EDN: VRVKQJ
2. Колесникова Е.Н. Экономическая безопасность: экономика и безопасность // Юридическая наука и практика: Вестник Нижегородской академии МВД России. 2013. № 21. С. 170–173. EDN: QZBUST
3. Филонов Н.Г. Анализ структуры совокупных издержек при формировании потока инноваций в логистических (экономических) системах // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2012. № 12 (127). С. 133–140. EDN: PUYNMZ
4. Бауэрсокс Д.Дж., Клосс Д.Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок / пер. с англ. 2-е изд. Москва : Олимп-Бизнес, 2006. 640 с. ISBN 978-5-9693-0124-5
5. Castells M. Informationalism, networks, and the network society: a theoretical blueprint. The network society: a cross-cultural perspective. Cheltenham; Northampton, MA: Elgar, cop., 2004. P. 3–49.
6. Goldman S.L. Collaborating in a complex environment. From bricks to bytes: Creating the virtual healthcare organization // Healthcare Forum Journal. 1998. Vol. 41 (3). P. 45–47. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10180191/> (accessed: 21.08.2025)
7. Патюрель Р. Создание сетевых организационных структур // Проблемы теории и практики управления. 1997. № 3.
8. Уорнер М., Витцель М. Виртуальные организации. Новые формы ведения бизнеса в XXI. Москва : Добрая книга, 2005. 295 с. ISBN 5-98124-043-1
9. Byrne J.A. The virtual corporation // Business Week. 8 February 1993. p. 98–102.
10. Maturana H.R., Varela F.G. Autopoiesis and Cognition. The realization of the living // Boston Studies in the Philosophy of Science. 1980. Vol. 42. P. 112–123. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-8947-4>
11. Von Foerster H. Observing Systems // Intersystems Publications. 1981. 331 p. ISBN 10 1127198309
12. Von Foerster H. Understanding understanding: Essays on cybernetics and cognition. N.Y.: Springer, 2003. 362 p. <https://doi.org/10.1007/b97451>
13. Гюллинг А.О., Воронцова Н.В. Визуализация алгоритма дейкстры // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 2. С. 127–132. EDN: KTEUTY

14. Нгуен Н.Х.К., Нечаев В.Н., Малыгин В.Н. Математическая модель и применение алгоритма *a*-star для оптимизации маршрутов ОВД в воздушном пространстве районного диспетчерского центра Хошимина // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2025. № 1. С. 64–85. https://doi.org/10.51955/2312-1327_2025_1_64 EDN: XGLVST

15. Болотов А.М. Модель транспортной задачи перевозки военных подразделений // *Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии*. 2023. № 2 (10). С. 11–16. EDN: GBMUNC

16. Энес А.З., Хажметов М.В., Бжихатлов К.Ч., Канкулов С.А. Разработка модуля предобработки изображений методом поиска в ширину для системы распознавания образов на основе мультиагентной нейрокognитивной архитектуры // *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии*. 2023. Т. 21. № 4. С. 46–53. <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2023-21-4-46-53> EDN: COCKFI

17. Пролубников А.В. Обходы графов, реализуемые итерационными методами решения систем линейных уравнений // *Прикладная дискретная математика*. 2025. № 68. С. 71–93. <https://doi.org/10.17223/20710410/68/5> EDN: FRXJRU

18. Калугин А.А., Гурьянов Л.В. Сравнение рекурсивной и итеративной реализации алгоритма поиска в глубину // *Вестник Пензенского государственного университета*. 2024. № 4 (48). С. 57–59. EDN: DQHMNY

19. Остапович О.С., Вишневецкий М.Р. Алгоритм планирования пути для БПЛА по геометкам // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2023. № 4 (72). С. 606–614. EDN: YSJRDU

20. Пестов И.Е., Федоров П.О., Федорова Е.С. Анализ методов обхода ориентированного графа // *I-methods*. 2022. Т. 14. № 3. EDN: OREUCQ

21. Cordella L.P., Foggia P., Sansone C., Vento M. A (Sub) Graph isomorphism algorithm for matching large graphs // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2004. Vol. 26 (10). P. 1367–1372. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2004.75>

22. Паначев А.А., Адияк Е.В., Берг Д.Б. Алгоритм идентификации графа замкнутых транзакций между экономическими агентами // *Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2021. № 3. С. 94–104. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2021-3-94-104> EDN: SKIHM

23. Зверева О.М., Берг Д.Б. Агент-ориентированная модель коммуникаций экономической системы в условиях межотраслевого баланса Леонтьева // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2013. № 6 (186). С. 77–86. EDN: RQQT MJ

24. Азарков Г.А. Влияние теневой экономики на социально-экономическое развитие региона // *Вестник УГТУ-УПИ. Серия: Экономика и управление*. 2008. № 1. С. 75–79. EDN: JUKNMZ

25. Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика // *Exponenta PRO: Математика в приложениях*. 2004. № 3–4. С. 38–47. EDN: TAXZBL

26. Апанасенко А.В., Паначев А.А., Берг Д.Б. Модельное управление ростом предпринимательской сети локального сообщества с автономизированными финансами // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2021. № 2. С. 20–26. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.02.02> EDN: UKDAQV

27. Берг Д.Б., Паначев А.А., Гаренских З.А. Классический сетевой эффект в организационно-замкнутых локальных экономических системах // *Новое в экономической кибернетике*. 2025. № 1. С. 11–23. EDN: VGHNAK

28. Попков В.В., Берг Д.Б., Ульянова Е.А., Селезнева Н.А. Моделирование как инструмент формирования товарной и финансовой сети в региональной экономике // *Экономика региона*. 2015. № 2 (42). С. 236–246. <https://doi.org/10.17059/2015-2-19> EDN: VHRTKZ

References

1. Andrianov VD. *Russia. Economic and investment potential*. Moscow: Ekonomika Publ.; 1999. (In Russ.) ISBN 5-282-01957-4 EDN: VRVKQJ

2. Kolesnikova EN. Economic security: economics and security. *Legal Science and Practice: Journal of Nizhny Novgorod Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2013;(21):170–173. (In Russ.) EDN: QZBUST

3. Filonov NG. The analysis of structure of cumulative costs while forming the production line of innovations in logistic (economic) systems. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2012;12(127):133–140. (In Russ.) EDN: PUYNMZ

4. Bowersox DJ, Kloss DJ. *Logistical Management: The Integrated Supply Chain Proces*. McGraw-Hill Companies; 1996. ISBN 0070068836, 9780070068834

5. Castells M. Informationalism, networks, and the network society: a theoretical blueprint. In: Castells M, editor. *The network society: a cross-cultural perspective*. Cheltenham; Northampton, MA: Edward Elgar; 2004. p. 3–49. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10180191/> (accessed: 21.08.2025).

6. Goldman SL. Collaborating in a complex environment. From bricks to bytes: Creating the virtual healthcare organization. *Healthcare Forum Journal*. 1998;41(3): 45–47. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10180191/> (accessed: 21.08.2025).

7. Paturel P. Network organizational structures creation. *Problems of theory and practice of management*. 1997;(3). (In Russ.)

8. Warner M, Witzel M. *Virtual organizations. New forms of doing business in the 21st century*. Moscow: Dobraya kniga Publ.; 2005. (In Russ.) ISBN 5-98124-043-1
9. Byrne JA. The virtual corporation. *Business Week*. 8 February 1993. p. 98–102.
10. Maturana HR, Varela FJ. Autopoiesis and cognition. Awareness of the living. *Boston Studies in the Field of Philosophy of Science*. 1980;42:112–123. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-8947-4>
11. Von Foerster H. *Observing systems*. Intersystems Publications, 1981. ISBN 10 1127198309
12. Von Foerster H. *Understanding: Essays on cybernetics and cognitive activity*. New York: Springer Publ.; 2003. <https://doi.org/10.1007/b97451>
13. Gulling AO, Vorontsova NV. Visualization of the Deistra algorithm. *Izvestiya Tula State University*. 2024;(2):127–132. (In Russ.) EDN: KTEUTY
14. Nguyen NHK, Nechaev VN, Malygin VN. Mathematical model and application of the a-star algorithm to optimize ATS routes in the area control Center Ho Chi Minh airspace. *Crede Experto: Transport, Society, Education, Language*. 2025;(1):64–85. (In Russ.) https://doi.org/10.51955/2312-1327_2025_1_64 EDN: XGLVST
15. Bolotov AM. Model of transport task of transportation of military units. *Almanac of the Perm Military Institute of the National Guard Troops*. 2023;2(10):11–16. (In Russ.) EDN: GBMUNC
16. Enes AZ, Khazhmetov MV, Bzhikhatlov KCh, Kankulov SA. Development of an image preprocessing by bidh-search method for a pattern recognition system based on multi-agent neurocognitive architecture. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2023;21(4):46–53. <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2023-21-4-46-53> EDN: COCKFI
17. Prolubnikov AV. Graph traversals implemented by iterative methods for solving systems of linear equations. *Applied Discrete Mathematics*. 2025;(68):71–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/20710410/68/5> EDN: FRXJRU
18. Kalugin AA, Guryanov LV. Comparison of recursive and iterative implementation of the depth-first search algorithm. *Vestnik of Penza State University*. 2024;4(48):57–59. (In Russ.) EDN: DQHMHY
19. Ostapovich OS, Vishnevsky MR. Path planning algorithm for UAV by geotags. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2023;4(72):606–614. (In Russ.) EDN: YSJRDU
20. Pestov IE, Fedorov PO, Fedorova ES. Analysis of directed Graph traversal methods. *I-methods*. 2022;14(3):5. (In Russ.) EDN: OREUCQ
21. Cordella LP, Foggia P, Sansone C, Vento M. A (sub)graph isomorphism algorithm for matching large graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2004;26(10):1367–1372. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2004.75>
22. Panachev AA, Adiyak EV, Berg DB. Algorithm for identifying a graph of closed transactions between economic agents. *Bulletin of AGTU. Ser.: Management, Computer Engineering and Informatics*. 2021;(3):94–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2021-3-94-104> EDN: SKIIHM
23. Zvereva OM, Berg DB. Economic system agent-based communication model based on Leontyev's intersectoral balance. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications AND Control Systems*. 2013;6(186):77–86. (In Russ.) EDN: RQQTMJ
24. Agarkov GA. The influence of black economy on social economic region development. *Bulletin of UGTU-UPI. Series: Economics and Management*. 2008;(1):75–79. (In Russ.) EDN: JUKNMZ
25. Borshchev AV. Practical agent-based modeling and its place in the analyst's arsenal. *Exponenta PRO: Mathematics in Applications*. 2004;3-4:38–47. (In Russ.) EDN: TAXZBL
26. Apanasenko AV, Panachev AA, Berg DB. Model growth management of the local community entrepreneurial network with autonomous finance. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2021;(2):20–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.02.02> EDN: UKDAQV
27. Berg DB, Panachev AA, Garenskiikh ZA. The classic network effect in economic systems. *New in Economic Cybernetics*. 2025;(1):11–23. (In Russ.) EDN: BGHHAK
28. Popkov VN, Berg DB, Ulyanova EA, Selezneva NA. Modeling as a tool for forming a commodity and financial network in the regional economy. *Economy of Region*. 2015;2(42):236–246. (In Russ.) <https://doi.org/10.17059/2015-2-19> EDN: VHRTKZ

Сведения об авторе

Паначев Антон Анатольевич, соискатель кафедры анализа систем и принятия решений, Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Российская Федерация, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; eLIBRARY SPIN-код: 7053-4760, ORCID: 0009-0006-7161-575X; e-mail: panachev1@mail.ru

About the author

Anton A. Panachev, PhD applicant of the Department of System Analysis and Decision Making, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU), 19 Mira St, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7053-4760, ORCID: 0009-0006-7161-575X; e-mail: panachev1@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-25-36
EDN: GZMJMP

Research article / Научная статья

Modification of the Structure and Parameters of Genetic Algorithms with Fuzzy Operators Implemented by Hybrid Controllers

Dmitry A. Rogachev^a, Aleksey F. Rogachev^b

^aFederal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov,
Moscow, Russian Federation

^bVolgograd State Agrarian University, Volgograd, Russian Federation
 rafr@mail.ru

Article history

Received: August 14, 2025.
Revised: November 1, 2025
Accepted: November 12, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The use of evolutionary genetic AI methods and, in particular, genetic algorithms (GA) ensures the construction of sufficiently universal optimization systems with various architectures and macroparameters. A systematic investigation of GA structures, parameters, and performance has made it possible to identify and synthesise key trends in their modification. The effects of GA structure and parameters on the timing and accuracy of fitness function optimization were performed on the OneMax binary chromosome coding test problem. Numerical studies of the solution of the problem of evolutionary genetic optimization have shown the applicability of a fuzzy controller to increase the efficiency of GA. Numerical experiments have demonstrated that the average fitness value increases rapidly during the initial stage of the optimization process, which can be attributed to the high initial crossover probability (P_c). After 20–50 epochs, the optimization process reaches a stable regime. The fuzzy adaptation of the parameters of the genetic operators makes the algorithm more robust compared to fixed parameters. Recommendations have been formulated for the selection of macroparameters and for substantiating the choice of algorithm modification strategies in specific application domains, including the allocation of limited water resources.

Keywords: optimization, modification of algorithms, adaptive parameters, membership function, fuzzy inference, water resources distribution

Authors' contribution

Rogachev D.A. — research concept and design, computer program development, text drafting; *Rogachev A.F.* — material collection, algorithm and program testing; results analysis, text drafting. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Rogachev DA, Rogachev AF. Modification of the structure and parameters of genetic algorithms with fuzzy operators implemented by hybrid controllers. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):25–36. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-25-36> EDN: GZMJMP

© Rogachev D.A., Rogachev A.F., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Модификация структуры и параметров генетических алгоритмов с нечеткими операторами, реализуемых гибридными контроллерами

Д.А. Рогачев^a, А.Ф. Рогачев^b

^a Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, Москва, Российская Федерация

^b Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Российская Федерация

✉ rafr@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 августа 2025 г.

Доработана: 1 ноября 2025 г.

Принята к публикации: 12 ноября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Применение эволюционно-генетических методов AI и, в частности генетических алгоритмов — genetic algorithms (GA), обеспечивает построение достаточно универсальных систем оптимизации с различными архитектурами и макропараметрами. Исследования структур, параметров и результатов функционирования GA, проведенные на основе системного подхода, позволили обобщить тенденции модификации GA, влияния структуры и параметров GA на время и точность оптимизации функции приспособленности проведены на тестовой задаче OneMax с бинарным кодированием хромосомы. Проведенные численные исследования решения задачи эволюционно-генетической оптимизации показали применимость нечеткого контроллера для повышения эффективности GA. Численными экспериментами показано, что среднее значение фитнес-функции быстро растёт в начале процесса оптимизации благодаря высокому значению начальной вероятности P_c , принимаемой для генетического оператора скрещивания. Через 20...50 эпох процесс стабилизируется. Нечеткая адаптация параметров генетических операторов делает алгоритм более робастным по сравнению с фиксированными параметрами. Сформулированы рекомендации по выбору макропараметров и обоснованию выбора варианты модификации алгоритмов для конкретных предметных областей, включая распределение ограниченных водных ресурсов.

Ключевые слова: оптимизация, модификация алгоритмов, адаптивные параметры, функция принадлежности, нечеткий вывод, нечеткий контроллер, распределение водных ресурсов

Вклад авторов

Рогачев Д.А. — концепция и дизайн исследования, разработка программы для ЭВМ, написание текста; *Рогачев А.Ф.* — сбор материалов, тестирование алгоритма и программы; анализ результатов, написание текста. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Рогачев Д.А., Рогачев А.Ф. Модификация структуры и параметров генетических алгоритмов с нечеткими операторами, реализуемых гибридными контроллерами // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 25–36. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-25-36> EDN: GZMJMP

Introduction

The application of evolutionary and genetic artificial intelligence methods, particularly genetic algorithms (GAs), makes it possible to develop versatile optimization systems with diverse architectures.

One example is hydromelioration under conditions of limited irrigation water supply. Classical

analytical methods of mathematical optimization, when applied to water resource allocation problems with a nonlinear objective function [1], do not always yield optimal solutions [2; 3]. Owing to numerous technological and environmental constraints, the optimization of water distribution requires nonlinear approaches, including artificial intelligence techniques and evolutionary genetic programming.

Genetic algorithms (GAs) are stochastic methods of global heuristic optimization inspired by the principles of natural evolution [4–7]. In conventional GAs, key parameters such as crossover probability (P_c) and mutation probability (P_m) are typically fixed throughout the search process. In contrast, adaptive GAs adjust these parameters dynamically in response to the state of the population (for example, its diversity or the fitness of individuals) in order to prevent premature convergence or stagnation. In this context, adaptive strategies that enable both structural and parametric modification of the GA during its operation have proven effective in solving optimization problems [9–13].

Numerous studies have examined methods for modifying genetic algorithms, focusing on several principal approaches: problem-oriented adaptation, procedure-oriented adaptation [14; 15], and the use of fuzzy controllers, including hardware implementations.

The problem-oriented approach involves adapting the fundamental components of the GA, such as designing the chromosome representation and selecting appropriate selection mechanisms, while accounting for the specific characteristics of the optimization problem.

Procedure-oriented adaptation involves modifying the GA architecture and its parameters during the optimization process, including their initial settings. This approach encompasses the use of adaptive fitness functions [18], dynamic adjustment of crossover probability (P_c) and mutation probability (P_m) [19; 20], as well as expansion of the solution search space [7]. In particular, [7] proposes an approach in which the values of P_c and P_m are varied according to the fitness of the current individuals. Noteworthy results have also been reported for hybrid parallel GAs [22] and AI-based GAs applied to time series forecasting [23].

Adaptive strategies employ feedback during the evolutionary modeling process to regulate para-

meter adjustments. An example from evolutionary strategies is the well-known Rechenberg rule, which is used to control the mutation rate. According to this rule, if the proportion of successful mutations exceeds a specified threshold (e.g., 0.2), the mutation rate should be increased; otherwise, it should be decreased.

One of the classical approaches to parameter adaptation, proposed in [6], is based on analyzing the dynamics of the fitness function. Other methods rely on measures such as population entropy or fuzzy logic; however, these approaches are generally more complex to implement.

Several algorithms for the adaptive modification of crossover and mutation parameters in genetic algorithms have been implemented in hardware, as reflected in, for example, US Patent US-4593367-A¹ and US Patent 6553357-B2².

A key challenge lies in selecting parameter values for problem-oriented GAs that ensure effective optimization with respect to both accuracy and computational efficiency. Because GAs are inherently dynamic and adaptive, the use of fixed parameter values contradicts the principle of evolutionary variability. This consideration motivates a natural evolutionary approach based on the adaptation of GA components during execution. Such an approach may incorporate feedback on the current state of the search process, predefined rules for dynamic parameter adjustment, and mechanisms for algorithm self-adaptation.

References [14; 16] outline the principal approaches to adaptation aimed at systematically improving GA performance, including deterministic adaptation, adaptive control, self-adaptation, and the use of fuzzy controllers.

Nevertheless, the selection of appropriate methods for modifying GA architecture and adjusting its parameters remains an open issue and requires further investigation, which constitutes the focus of this study.

¹ Guha A., Harp S.A., Samad T. Genetic algorithm synthesis of neural networks. Patent US-4593367-A, United States, 1989. URL: <https://patents.google.com/patent/US5140530A/en> (дата обращения: 20.11.2025).

² Mathias K.E., Eshelman L.J., David J.D. Method for improving neural network architectures using evolutionary algorithms. Patent US-6553357-B2, United States, 2003. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5140530A/en> (accessed: 20.11.2025).

1. Methods and Materials

The *objective of this study* is to substantiate a fuzzy-based approach to modifying GA parameters as a direction of combinatorial artificial intelligence, to implement it in software, and to evaluate its effectiveness using a test function.

The influence of the main GA parameters on accuracy and computational performance was analyzed using the well-known OneMax test problem, for which the fitness function is defined as [5], and whose global maximum is known a priori:

$$f = \sum_{i=0}^{N-1} \text{indiv}[i], \quad (1)$$

where i denotes the gene index in the chromosome and N represents the total number of genes.

The genetic selection operator was implemented using the tournament selection method with a parameter of $n = 3$, within the recommended tournament size range of 2–4. To ensure comparability of results, the number of epochs was fixed at $n = 50$ across all experiments.

The crossover probability was adjusted according to individual fitness: it decreased for highly fit individuals in order to preserve high-quality solutions and increased for less fit individuals to promote greater search diversity.

The crossover probability parameter is adapted according to the fitness values of the parent individuals:

$$P_C = \begin{cases} \frac{k_1 (f_{\max} - f')}{(f_{\max} - \bar{f})} & \text{if } f' > \bar{f}, \\ k_2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

where \bar{f} denotes the average fitness value of the population.

A similar dependence was used to modify the mutation probability P_m , but for a single individual:

$$P_m = \begin{cases} k_3 \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & \text{if } f \geq f_{\text{avg}}, \\ k_4 & \text{if } f < f_{\text{avg}}. \end{cases} \quad (3)$$

Mutation intensity is increased for individuals whose fitness falls below the population average in order to introduce greater variation and reduce the

risk of convergence to local optima. These update rules are applied iteratively: at each generation, f_{\max} and f_{avg} are computed, after which the crossover and mutation parameters are adjusted for the corresponding operators. If the convergence condition is satisfied ($f_{\max} = f_{\text{avg}}$), both parameters P_c and P_m are set to their maximum values to restore population diversity.

In this study, the population size (N) was selected within the range of 40–100 individuals and remained fixed, although dynamic adjustment is possible. Smaller populations (20–50 individuals) are typically employed to accelerate computation, whereas larger populations (50–100 individuals) are preferable for high-dimensional problems in order to preserve diversity.

The number of epochs (generations) was selected in the range up to 500 depending on the stopping criterion, for example, no improvement in 50 generations.

A random uniform population was used for initialisation.

The study of adaptive GA modification methods was carried out in Python without using a specialised library, such as DEAP, to ensure the reproducibility of the results.

2. Results

Below are the specific features of GA that were investigated and tested on the OneMax test task, including changes in structure and parameters using fuzzy controllers.

2.1. Analysis of the Influence of Genetic Algorithm Structure

The plan for the numerical experiments based on the OneMax test problem comprised the following stages:

- evaluation of the effectiveness of the genetic mutation operator and analysis of the influence of the mutation probability (P_m);
- execution of a baseline genetic selection procedure without crossover or mutation;
- assessment of the impact of introducing the crossover operator without mutation;
- implementation and analysis of the classical version of the algorithm.

During the basic numerical experiments, the following values of the basic GA parameters were taken:

- GA constants: population.size = 200; p_crossover = 0.9; p_mutation = 0.1; max_generations = 50;
- a constant representing the length of the bit string to be optimized, one_max_length = 70...100.

The modified program code was designed to record the set of fitness values for all individuals at each epoch, along with the corresponding average and maximum fitness values.

The results of the analysis of the GA configuration incorporating only the mutation operator (i.e., random search without crossover), examined as a function of the mutation probability parameter, are presented in Figure 1.

The maximum value attained was $Y_{\max} = 90+$, accompanied by a substantial increase in the dispersion among individuals; however, the global optimum was not reached under this configuration. The graphical analysis of the search dynamics presented in Figure 1 further indicates that the selected number of epochs (50) was insufficient.

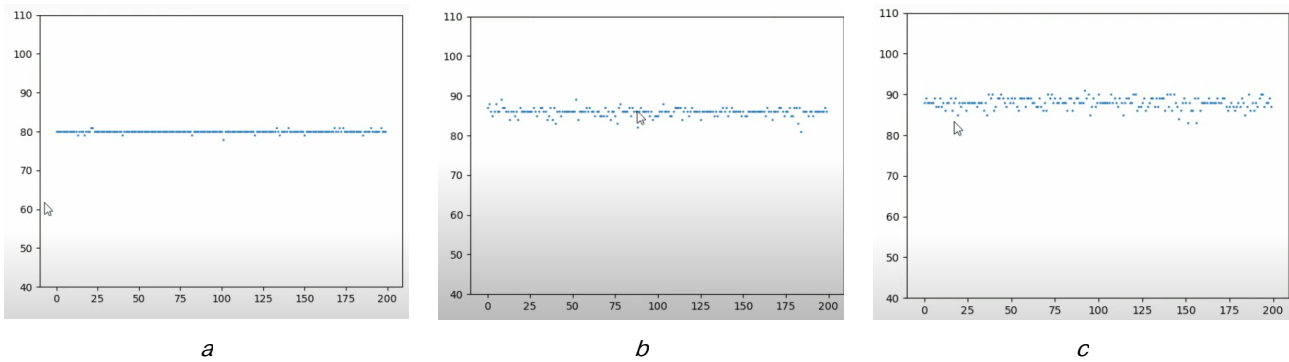


Figure 1. The results of the genetic search depending on the value of the probability of mutation of the genetic algorithm (random search without crossing):
a — $P_m = 0.1$; *b* — $P_m = 0.5$; *c* — $P_m = 0.9$
 Source: by D.A. Rogachev.

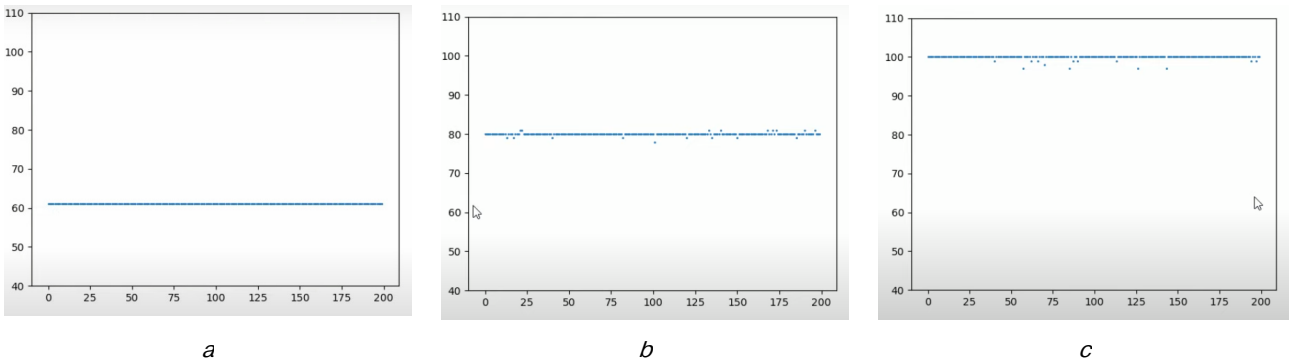


Figure 2. The results of the genetic search for the maximum at the number of epochs $n = 50$:
a — using only the operator of ‘pure’ selection without crossing and mutation;
b — using the operator of ‘pure’ mutation (random search without crossing), *c* — the combined use of 3 genetic operators
 Source: by D.A. Rogachev.

The performance of the algorithm using only the ‘pure’ selection operator, without crossover or mutation, over 50 epochs is illustrated in Figure 2, *a*.

When only the genetic operator of ‘pure’ selection without crossover and mutation was applied, the highest value achieved was $Y_{\max} = 61$,

and the maximum search problem was not solved in this variant.

The effectiveness of using the genetic operator of ‘pure’ mutation (random search without crossover) is shown in Figure 2, *b*. The maximum value achieved was $Y_{\max} = 82$, but the solution to the

maximum search problem was also not achieved in this variant.

The effectiveness of the combined application of all three genetic operators is shown in Figure 2, *c*. The maximum value achieved was $Y_{\max} = 100$,

which corresponds to the achievement of the solution to the test problem of finding the maximum.

A visual sequence of the phases of solving the OneMax problem using a classical GA with three genetic operators is shown in Figure 3.

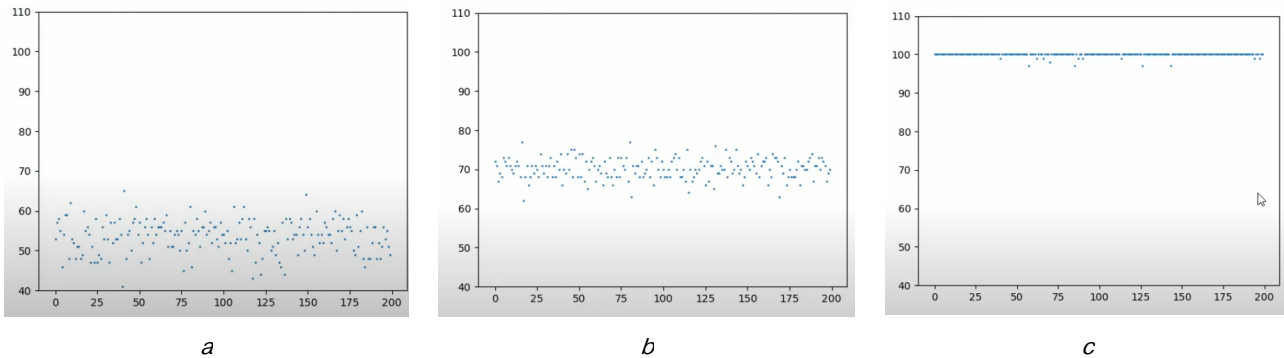


Figure 3. Phases of solving the maximum search for different values of the number of epochs:
a — $n = 5$; *b* — $n = 25$; *c* — $n = 50$
 Source: by D.A. Rogachev.

It should be noted that the selected number of epochs was sufficient to obtain a satisfactory solution to the OneMax test problem.

The results of the numerical experiments indicate that the combined use of all principal GA operators (selection, crossover, and mutation) is advisable. The following subsections examine various approaches to modifying GA parameters in order to enhance algorithmic efficiency and stability.

2.2. Adaptation of Population Size

The study hypothesized, and numerical experiments were conducted to verify, that varying the population size during GA execution would influence its performance.

Reference [19] describes a “sawtooth” GA in which changes in population size are combined with periodic reinitialization, thereby enhancing algorithmic efficiency. In this approach, the population size is defined by a function, for example, relationship (4), parameterized by D and T .

$$n(t) = \text{int} \left(\frac{\bar{n} + D - 2D \left(t - T \text{int} \left(\frac{t-1}{T} \right) - 1 \right)}{(T-1)} \right), \quad (4)$$

where D denotes the maximum population size (in individuals), and T represents the reinitialization period, expressed in epochs.

According to equation (4), the population size varies over time in a ‘sawtooth’ pattern, providing a compromise between expansion of the search space and computational efficiency.

A hardware implementation of adaptive GA modification is also feasible, as described, for example, in Russian Patent No. 2602973 [25]. To enhance performance, the controller incorporates a genetic algorithm parameter optimization unit with three outputs corresponding to the selection, crossover, and mutation operators, as well as an iteration counter.

2.3. Adjustment of Crossover and Mutation Parameters Using a Fuzzy Controller

Fuzzy logic controllers (FLCs) provide an effective mechanism for dynamically adjusting GA parameters, such as crossover and mutation probabilities. Based on L. Zadeh’s theory of fuzzy logic, they enable the representation of uncertainty and qualitative knowledge (e.g., “population diversity is low”) through linguistic variables and rule-based inference. This capability is particularly valuable in genetic algorithms, where fixed para-

meter settings may lead to premature convergence or stagnation. By adapting parameters in response to the current state of the population, such as diversity levels or changes in fitness, FLCs help balance exploration and exploitation.

In GAs, the application of an FLC typically follows a structured procedure: at each generation (or after a predefined number of generations), the controller evaluates relevant population metrics, applies a set of fuzzy rules, and determines parameter adjustments accordingly. This adaptive mechanism enhances GA performance, particularly in complex optimization problems involving multimodal objective functions. In the literature, this approach is commonly referred to as a fuzzy adaptive genetic algorithm (FAGA).

The FLC application procedure comprises six stages.

1. Identification of input variables, including metrics that characterize the state of the GA.

Typical inputs include:

- population diversity, measured either genotypically (e.g., Euclidean distance between chromosomes, ED) or phenotypically (e.g., $PDM1 = \frac{f_{max}}{f_{avg}}$,

where f_{max} and f_{avg} denote the maximum and average values of the fitness function (FF), respectively);

- change in the fitness function (Δf), for example, defined as

$$\Delta f = (f_{avg}^t - f_{avg}^{t-1}) / f_{avg}^{t-1}, \quad (5)$$

where t represents the current generation.

Additional metrics may include VAC (variance of allele distribution within chromosomes) and AVA (average variance of allele distribution).

Input variables are typically normalized to the range [0, 1].

2. The fuzzification stage involves defining fuzzy sets through membership functions (MFs) for each input variable. Triangular or trapezoidal membership functions are most commonly employed. For example, population diversity may be described using the linguistic terms ‘Low’ (0–0.4), ‘Medium’ (0.3–0.7), and ‘High’ (0.6–1.0). Mathematically, the membership degree $\mu(x)$ for a

triangular MF with center c and width w can be expressed as

$$\mu(x) = \max(0, 1 - |x - c|/w). \quad (6)$$

3. Rule base: A set of “if — then” rules is constructed on the basis of expert knowledge, linking input variables to output parameters. For example: ‘If diversity is Low and Δf is Small, then significantly increase P_m ’ (to enhance diversity). The rule set may be defined using expert judgment or optimized, for instance, by means of another GA.

4. Inference: Mamdani or Sugeno inference schemes are typically employed to aggregate the rules. For each rule, the activation degree is computed (e.g., as the minimum of the corresponding membership function values $\mu(x)$), after which the rule outputs are combined.

5. Defuzzification: The fuzzy inference results are converted into crisp parameter values. A commonly used method is the centroid (center-of-gravity) approach.

$$y = \sum(\mu_i \cdot y_i) / \sum \mu_i, \quad (7)$$

where y_i are the centres of the output MF.

New parameters:

$$P_c^{new} = P_c^{old} \Delta P_c \quad (8)$$

or

$$P_c^{new} = P_c^{old} + \Delta P_c \quad (9)$$

with constraints (e.g., $P_c \in [0.5, 0.9]$).

6. Integration into the GA: The FLC is invoked periodically, for example, every k generations. The recommended initial parameter settings are $P_c \approx 0.6 - 0.8$ and $P_m \approx 0.01$, depending on the type of fitness function.

2.4. Numerical Study of Crossover and Mutation Probability Adjustment Using a Fuzzy Logic Controller

The following input variables were used:

- Diversity ($PDM1 = f_{max}/f_{avg}$), normalized from the interval [1, 2] to [0, 1];
- Δf (change in average fitness, normalized within the range [-1, 1])

Triangular membership functions were defined with the following parameters:

- for diversity: Low (center 0.2), Medium (0.5), High (0.8).
- for Δf : Negative (center -0.5), Zero (0), Positive (0.5).
- for ΔP_c , ΔP_m : Small (0.7), Medium (1.0), Big (1.3).

The fuzzy inference rule base comprised a complete set of nine if–then rules corresponding to

the two inputs (3×3 combinations). The rule set, implemented as a dictionary in the Python language, is presented in Figure 4.

The expert rule base designed to maintain the exploration/exploitation balance is structured with keys defined as pairs (Diversity_Label, Delta_f_Label) and corresponding output values (Small, Medium, Large) specified in the dictionaries for 'delta_pc' и 'delta_pm'.

```
rules = {
('low', 'negative'): {'delta_pc': 'small', 'delta_pm': 'big'},
('low', 'zero'): {'delta_pc': 'medium', 'delta_pm': 'big'},
('low', 'positive'): {'delta_pc': 'big', 'delta_pm': 'medium'},
('medium', 'negative'): {'delta_pc': 'small', 'delta_pm': 'medium'},
('medium', 'zero'): {'delta_pc': 'medium', 'delta_pm': 'medium'},
('medium', 'positive'): {'delta_pc': 'big', 'delta_pm': 'small'},
('high', 'negative'): {'delta_pc': 'small', 'delta_pm': 'small'},
('high', 'zero'): {'delta_pc': 'medium', 'delta_pm': 'small'},
('high', 'positive'): {'delta_pc': 'big', 'delta_pm': 'small'},
}
```

Figure 4. A fragment of the Database of expert rules in the code of the GA program
Source: by D.A. Rogachev.

2.5. Python Code for a Fuzzy Adaptive Genetic Algorithm

As an illustration, consider the implementation of a simple genetic algorithm incorporating a fuzzy controller to adapt the parameters P_c (crossover probability) and P_m (mutation probability). The NumPy library was used for array operations, while Matplotlib was employed for visualization of the fitness function dynamics. Fuzzy logic was implemented using triangular membership functions, and inference was performed according to the Mamdani method without relying on external fuzzy logic libraries.

The OneMax problem was addressed, involving maximization of the sum of bits in a binary chromosome of length 20 or 40. The population consisted of 50 individuals and was evolved over 50 generations. Parameter adaptation was based on diversity metrics and the change in the average fitness value.

Code fragments illustrating the single-point crossover and mutation procedures are presented in Figure 5.

Simple membership functions $\mu(x)$ in $[0, 1]$ of triangular shape with vertices a, b, c are defined by the following fragment (Figure 6).

The fuzzyfying function for the diversity value breaks it down into linguistic variables *low*, *medium*, and *high*. It takes the normalised value of diversity div in the range $[0, 1]$ as input and returns a dictionary with linguistic degrees of membership. Similarly, for delta, it takes as input a change delta normalised in the range $[-1, 1]$ (Figure 7).

The output values are defined as follows: small = 0.7 (decrease), medium = 1.0 (no change), and big = 1.3 (increase). These coefficients serve as multipliers for P_c and P_m and are specified in the code as

```
output_values = {"small": 0.7,
"medium": 1.0, "big": 1.3}.
```

Inference and defuzzification are implemented using the Mamdani method, which approximates the centroid of the aggregated output. The rules are combined using minimum activation, and the final crisp value is obtained as a weighted average (Figure 8).

```
def crossover(parent1, parent2, pc):
    if np.random.rand() < pc:
        point = np.random.randint(1, len(parent1) - 1)
        child1 = np.concatenate((parent1[:point], parent2[point:]))
        child2 = np.concatenate((parent2[:point], parent1[point:]))
        return child1, child2
    return parent1, parent2
# Mutation function: flip bit with probability pm.
# Inverts the bit (0->1 or 1->0) for each gene independently.
def mutation(individual, pm):
    for i in range(len(individual)):
        if np.random.rand() < pm:
            individual[i] = 1 - individual[i]
    return individual
```

Figure 5. Code snippets for single-point crossing and mutation functions

Source: by D.A. Rogachev.

```
def triangular_mf(x, a, b, c):
    if x <= a or x >= c:
        return 0.0
    elif a < x <= b:
        return (x - a) / (b - a)
    else:
        return (c - x) / (c - b)
```

Figure 6. Code snippets for calculating membership functions

Source: by D.A. Rogachev.

```
def fuzzify_diversity(div):
    low = triangular_mf(div, 0, 0.2, 0.4)
    medium = triangular_mf(div, 0.3, 0.5, 0.7)
    high = triangular_mf(div, 0.6, 0.8, 1.0)
    return {'low': low, 'medium': medium, 'high': high}
# Fuzzification: for delta_f (fitness function changes).
def fuzzify_delta_f(delta):
    negative = triangular_mf(delta, -1, -0.5, 0)
    zero = triangular_mf(delta, -0.2, 0, 0.2)
    positive = triangular_mf(delta, 0, 0.5, 1)
    return {'negative': negative, 'zero': zero, 'positive': positive}
```

Figure 7. Code snippets for fuzzification

Source: by D.A. Rogachev.

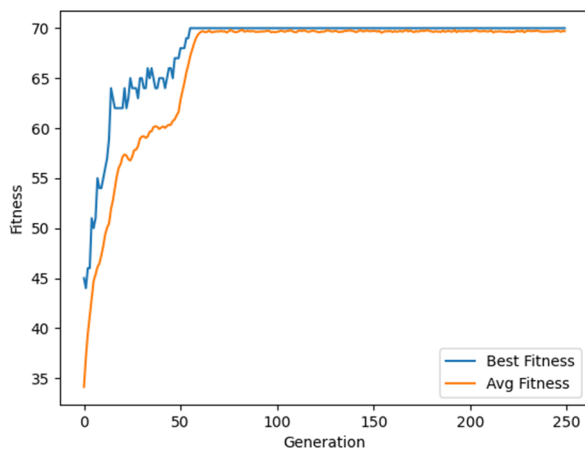
```
def fuzzy_inference(div_fuzzy, delta_fuzzy):
    delta_pc_num, delta_pc_den = 0, 0
    delta_pm_num, delta_pm_den = 0, 0
    for (div_l, delta_l), outputs in rules.items():
        activation = min(div_fuzzy.get(div_l, 0), delta_fuzzy.get(delta_l, 0))
        if activation > 0:
            delta_pc_num += activation * output_values[outputs['delta_pc']]
            delta_pc_den += activation
            delta_pm_num += activation * output_values[outputs['delta_pm']]
            delta_pm_den += activation
    delta_pc = delta_pc_num / delta_pc_den if delta_pc_den > 0 else 1.0
    delta_pm = delta_pm_num / delta_pm_den if delta_pm_den > 0 else 1.0
    return delta_pc, delta_pm
```

Figure 8. A fragment of the defuzzification code

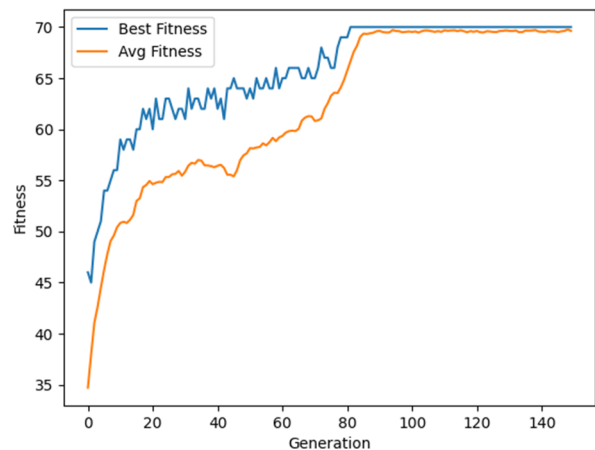
Source: by D.A. Rogachev.

This function takes as input the membership dictionaries of the variables `div_fuzzy` and `delta_fuzzy` and returns `delta_pc` and `delta_pm` as output multipliers.

In the program code, the linguistic output values are generated according to the rule base (see Figure 4). For example, if the first input variable is assigned the linguistic value ‘small’ and the second input has the linguistic value ‘negative’, then the parameter ‘delta_Pc’ is assigned the linguistic value ‘small’, while ‘delta_Pm’ is assigned the value “high.”



a



b

Figure 9. Results of the GA operation with a fuzzy controller:
a — `chrom_length = 70`, `pop_size = 70`; b — `chrom_length = 70`, `pop_size = 90`
Source: by D.A. Rogachev.

As shown in Figure 9, the algorithm successfully converges to the global optimum of the OneMax problem, where the fitness value equals 70 when all bits are set to 1. Although such convergence is expected for a relatively simple problem with a chromosome length of 70 over 150 generations, the fuzzy controller enables adaptive adjustment of parameters, particularly in situations of low diversity when the population begins to converge. In such cases, the controller increases P_m to introduce additional randomness. When the fitness function improves, it increases P_c to enhance exploitation. On average, convergence occurs within 80 to 100 generations based on typical runs, although the results may vary due to the stochastic nature of the initialization process.

The main GA loop with fuzzy adaptation accepts the chromosome length (`chrom_length = 70`), population size (`pop_size`), and number of generations ($T = 150$) as input parameters and implements all genetic operators. The population is initialized with random binary vectors.

Typical GA performance results for different population sizes are presented in Figure 9. The output is defined as the best fitness value obtained in the final generation, and the evolution of both the best individual fitness and the population average fitness is illustrated graphically.

When the algorithm is executed multiple times, the average fitness value increases rapidly at the initial stage, primarily due to the relatively high initial value of P_c , and subsequently stabilizes. Fuzzy adaptation improves the robustness of the GA compared to implementations with fixed parameter settings.

The adaptation mechanism can be implemented in the form of a fuzzy logic ‘controller’ that realizes a system of fuzzy production rules through software or hardware solutions.

Conclusion

A systematic analysis of GA structures, parameters, and performance outcomes has made it possible to generalize key directions for GA

modification. An investigation of the influence of GA structure and parameter settings on the time and accuracy of fitness function optimization, conducted using the OneMax problem with binary chromosome encoding, enabled the formulation of recommendations for selecting macroparameters and for substantiating algorithm modification strategies in specific application domains, including the allocation of limited water resources in arid conditions. The solution of the evolutionary genetic optimization problem confirmed the applicability of a fuzzy controller within the GA framework. Numerical experiments demonstrated that the average fitness value increases rapidly at the initial stage of the optimization process due to the relatively high initial crossover probability (P_c), after which it stabilizes. Fuzzy adaptation enhances the robustness of the GA compared with fixed parameter settings.

References

1. Rogachev D, Yurchenco I, Rogachev A. Management and optimization of systematic water adjustment by economic-mathematic modeling methods and AI. *International Russian Automation Conference*; 2023 Sept 10–16: Sochi, Russian Federation. 2023. p. 888–893. <http://doi.org/10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272907> EDN: PWNESZ
2. Melikhova EV, Rogachev AF. Computer simulation and optimization of parameters of configuration of the contour of moistening under drip irrigation of agricultures. In: Popkova E, editor. *Ubiquitous Computing and the Internet of Things: Prerequisites for the Development of ICT. Studies in Computational Intelligence*. Cham: Springer; 2019. p. 1193–1201. http://doi.org/10.1007/978-3-030-13397-9_122 EDN: FJWSYW
3. Melikhova EV, Rogachev AF, Skiter NN. Information system and database for simulation of irrigated crop growing. *Studies in Computational Intelligence*. 2019; 826:1185–1191. http://doi.org/10.1007/978-3-030-13397-9_121 EDN: WGYXJK
4. Skobtsov Y, Sekirin A, Zemlyanskaya S, Chengar O, Skobtsov V, Potryasaev S. Application of object-oriented simulation in evolutionary algorithms. In: Silhavy, R., Senkerik, R., Oplatkova, Z.K., Silhavy, P., Prokopova, Z. editors. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer. 2016. p. 453–462. http://doi.org/10.1007/978-3-319-33389-2_43 EDN: WWDZIT
5. Murillo-Morera J, Quesada-López C, Castro-Herrera C, Jenkins M. A genetic algorithm based framework for software effort prediction. *Journal of Software Engineering Research and Development*. 2017;5(4):1–33. <https://doi.org/10.1186/s40411-017-0037-x>
6. Patnaik LM, Mandavilli S. Adaptation in genetic algorithms. In: *Genetic Algorithms for pattern Recognition*. CRC Press; 1996. 1st ed. p. 45–64. <http://doi.org/10.1201/9780203713402-3>
7. Mahfoud SW. A comparison of parallel and sequential niching methods. *Proceedings of VI International conference on genetic algorithms*. 1995;136–143. Available from: <https://dblp.org/rec/conf/icga/Mahfoud95.html> (accessed: 12.05.2025)
8. Grefenstette JJ. Lamarckian learning in multi-agent environment. *Proceedings of the 4th international conference on genetic algorithms*. 1991;303–310. Available from: <https://dblp.org/rec/conf/icga/Grefenstette91> (accessed: 12.05.2025).
9. Whitley D, Gordon V, Mathias K. Lamarckian evolution, the Baldwin effect & function optimization. *Parallel Problem Solving from Nature — PPSN III. PPSN 1994. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Publ.; 1994;866:5–15. https://doi.org/10.1007/3-540-58484-6_245
10. Davidor Y. A genetic algorithm applied to robot trajectory generation. In: Davis L, editor. *Handbook of genetic algorithms*. New York: Van Nostrand Reinhold Publ.; 1991.
11. Moscato P, Norman MG. A memetic approach for the traveling salesman problem: implementation of computational ecology for combinatorial optimization on message-passing systems. *Parallel computing and transputer applications*. Fogarty TC, editor. Berlin, Heidelberg: Springer Publ.; 1992;1:177–186.
12. Radcliffe NJ, Surry PD. Formal memetic algorithm. In: Fogarty TC, editor. *Proceeding — Selected Papers from AISB Workshop on Evolutionary Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer Publ.; 1994. p. 1–16. https://doi.org/10.1007/3-540-58483-8_1
13. Singh BK, Misra AK. Software effort estimation by genetic algorithm tuned parameters of modified constructive cost model for NASA software projects. *International Journal of Computer Applications*. 2012;59(9):22–26. <https://doi.org/10.5120/9577-4053>
14. Herera F, Lozano M. Adaptation of genetic algorithm parameters based on fuzzy logic controllers. In: Herera F, Verdegay J, editors. *Genetic algorithms and soft computing*. 1996;95–125.
15. Mitsuo G, Runwei C, Lin L. *Network models and optimization*. London: SpringerVerlag London Limited; 2008. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-181-7>
16. Hinterding R, Michalewicz Z, Eiben A. Adaptation in evolutionary computation: a survey. *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC '97)*; 1997 Apr 3–16; Indianapolis, IN, USA; IEEE; 2002 Aug 06 p. 65–69. <http://doi.org/10.1109/ICEC.1997.592270>

17. Davis L. *Handbook of genetic algorithms*. New York: Van Nostrand Reinhold; 1991. ISBN 10 0442001738
18. Juldstrom B. What have you done for me lately adapting operator probabilities in a steady-state genetic algorithm. *Proceedings 6th international conference on Gas*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publ.; 1995. p. 81–87. ISBN 1-55860-370-0
19. Koumousis VK, Katsaras CP. A saw-tooth genetic algorithm combining the effects of variable population size and reinitialization to enhance performance. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2006;10(1): 19–28. <http://doi.org/10.1109/TEVC.2005.860765>
20. Lin L, Gen M. Auto-tuning strategy for evolutionary algorithms: Balancing between exploration and exploitation. *Soft Computing*. 2009;13:157–168. <http://doi.org/10.1007/s00500-008-0303-2> EDN: IYKVAZ
21. Moel MC, Stewart CV, Kelly RB. Reducing the search time of a steady state genetic algorithm using the immigration operator. *Proceedings IEEE International Conference Tools for AI*. 1991 Nov 10–13; Danbury, CT, USA; IEEE; 1991. p. 500–501. <http://doi.org/10.1109/TAI.1991.167032>
22. Gladkov LA, Gladkova NV, Semushin EY. Parallel hybrid genetic algorithm for solving design and optimization problems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. In: Hu Z, Petoukhov S, He M. editors. 2020; 1127:249–258. http://doi.org/10.1007/978-3-030-39216-1_23 EDN: PMLJYG
23. Kureychick VM, Kaplunov TG. Time series forecasting method based on genetic algorithm for predicting the conditions of technical systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;032046. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/3/032046> EDN: OZIEUE
24. Labinskiy A. The perspective trend of use the genetic algorithm. *Natural and Man-Made Risks (Physico-Mathematical and Applied Aspects)*. 2023;2(45):81–88. (In Russ.) EDN: SXNYDF
25. Rogachev DA, Kirejcheva LV, Yurchenko IF, Timoshkin AD, Kuznetsov YuS, Frolina EA. *Neural network with genetic algorithm training control device*. Patent of the Russian Federation No. 2843987 C1, IPC G06N 3/08, No. 2024120049: application 07.17.2024: published 07.23.2025. EDN: ZSPIAC

About the authors

Dmitry A. Rogachev, PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, 44/2 Bolshaya Akademicheskaya St, Moscow, 127434, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8413-5020, ORCID: 0009-0003-4014-4770; e-mail: Rogachev.soft@gmail.com

Aleksey F. Rogachev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mathematical Modeling and Computer Science, Volgograd State Agrarian University, 28 Lenina avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8413-5020, ORCID: 0000-0002-3077-6622; e-mail: rafr@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-37-48

EDN: GZUFOY

Научная статья / Research article

Автоматизация инженерных расчетов в системе информационно-аналитической подготовки специалистов техносферной безопасности

Е.Н. Трофимец^{ID✉}, Т.А. Селеменова^{ID}

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ ezemifort@inbox.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 октября 2025 г.

Доработана: 14 декабря 2025 г.

Принята к публикации: 20 декабря 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Рассмотрены вопросы автоматизации инженерных расчетов в системе информационно-аналитической подготовки специалистов техносферной безопасности. Использован оптимизационный метод дифференциального исчисления в инженерных расчетах при решении задачи оперативной ликвидации последствий аварийной ситуации, поиска пропавших без вести членов экипажа судна в условиях ухудшения видимости. Приведена автоматизация инженерных расчетов средствами Mathcad и Excel. Представлены и описаны последовательные этапы инженерных расчетов в процессе решения задачи техносферной безопасности классическим методом дифференциального исчисления и при использовании математического пакета Mathcad, табличного процессора Excel. Обоснована эффективность вычислительных расчетов в процессах быстрого реагирования и принятия решений при чрезвычайных ситуациях. Аргументировано повышение уровня подготовки специалистов техносферной безопасности при внедрении цифровых технологий в инженерные расчеты. Отличительной особенностью данной работы является рассмотрение смоделированной чрезвычайной ситуации техногенного характера в рамках проведения межведомственного опытно-исследовательского учения «Безопасная Арктика» в российском городе Мурманске. Авторами предложена необходимость автоматизации контроля чрезвычайной ситуации техногенного характера в режиме реального времени по оптимальной освещенности области. Проведен анализ педагогических подходов и авторских методик решения профессионально ориентированных задач. Предложен рациональный подход к расчету освещенности области с применением производной. Оригинальность результата заключается в методике нахождения оптимальной высоты для освещенности области чрезвычайной ситуации, основанной на дифференциальном исчислении и сравнительном анализе графиков функций, полученных автоматизацией расчета для принятия оперативных мер реагирования. Основные результаты исследования позволяют повысить эффективность спасательной операции в условиях ухудшения видимости.

Ключевые слова: математическое моделирование, цифровизация, оптимизация, источник света, производная, Mathcad, Excel

© Трофимец Е.Н., Селеменова Т.А., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Вклад авторов

Трофимец Е.Н. — общая концепция исследования, научное руководство, написание текста, визуализация, верификация, валидация; Семенова Т.А. — написание текста, верификация, валидация. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Трофимец Е.Н., Семенова Т.А. Автоматизация инженерных расчетов в системе информационно-аналитической подготовки специалистов техносферной безопасности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 37–48. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-37-48> EDN: GZUFOY

Automation of Engineering Calculations in an Information and Analytical Training System for Technosphere Safety Specialists

Elena N. Trofimets^{ORCID}[✉], Tatiana A. Selemeneva^{ORCID}

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russian Federation

✉ ezemifort@inbox.ru

Article history

Received: October 12, 2025

Revised: December 14, 2025

Accepted: December 20, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. This study examines the automation of engineering calculations within an information and analytical training system for specialists in technosphere safety. It applies an optimization approach based on differential calculus to address tasks related to the rapid elimination of emergency consequences, including the search for missing vessel crew members under conditions of reduced visibility. The study demonstrates how Mathcad and Excel can be used to automate engineering calculations. It describes the sequential stages of solving technosphere safety problems, integrating the classical methods of differential calculus with their practical implementation in the Mathcad mathematical package and the Excel spreadsheet environment. The findings confirm that automated computation enhances the efficiency of rapid response and supports informed decision-making in emergency situations. Furthermore, incorporating digital technologies into engineering calculations contributes to improving the professional training of technosphere safety specialists. A distinctive aspect of the study is the analysis of a simulated man-made emergency conducted within the framework of the interdepartmental experimental and research exercise “Safe Arctic” in Murmansk, Russia. The authors emphasize the importance of real-time automation in managing technogenic emergencies, particularly through determining optimal area illumination. The study also examines relevant pedagogical approaches and presents the authors’ methods for solving professionally oriented tasks. A rational procedure for calculating area illumination using derivatives is proposed. The originality of the research lies in the methodology for determining the optimal height for illuminating an emergency zone, which combines differential calculus with a comparative analysis of function graphs generated through automated calculations. The results contribute to improving the effectiveness of rescue operations in conditions of limited visibility.

Keywords: mathematical modeling, digitalization, optimization, light, source, derivative

Authors’ contribution

Трофимец Е.Н. — general research concept, scientific guidance, writing, visualization, verification, validation; Семенова Т.А. — writing, verification, validation. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Trofimets EN, Selemeneva TA. Automation of engineering calculations in an information and analytical training system for technosphere safety specialists. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):37–48. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-37-48> EDN: GZUFOY

Введение

Будущие специалисты по техносферной безопасности сталкиваются с необходимостью выполнения сложных инженерных расчетов для оценки рисков, проектирования защитных систем, анализа аварийных ситуаций и других задач. Автоматизация этих процессов позволяет повысить точность, скорость и эффективность работы, а также способствует более качественной подготовке специалистов техносферной безопасности. В современных условиях автоматизация инженерных расчетов связана с цифровой трансформацией вычислительных процессов, которые играют ключевую роль в повышении эффективности управления техносферной безопасностью. Цифровые технологии позволяют не только ускорить расчетные процессы, но и перевести всю систему безопасности на новый уровень анализа, прогнозирования и принятия решений.

Цифровизация стала одним из ключевых трендов современного образовательного пространства, особенно в области инженерных расчетов. Математическое образование, являющееся фундаментом для подготовки инженеров техносферной безопасности, активно интегрируется с цифровыми технологиями. Методологические вопросы цифровизации математического образования рассмотрены в [1–7] с уклоном на практические задачи классического характера без рассмотрения профессионально ориентированных задач. Цифровой трансформации системы высшего образования и цифровым технологиям в управлении образованием посвящены работы [8–14], в которых рассматриваются содержание, методы и формы цифровизации образования в общем виде. Концепции цифровизации инженерного и математического образования раскрыты в меньшей степени. Ключевыми компонентами процесса цифровизации образования являются информационные технологии, интегративный и компетентностный подходы, исследовательская деятельность студентов, которые позволяют повысить качество обучения, сделать его более интерактивным, доступным и адаптивным к потребностям

обучающихся. Данные направления отражены в [14–23] с акцентом на решение классических и практико-ориентированных задач. В данном исследовании авторы смещают фокус внимания на профессионально ориентированные задачи с рассмотрением различных практических ситуаций для инженеров техносферной безопасности и спасателей.

Такие педагогические подходы позволяют повысить качество обучения, сделать его более интерактивным, доступным и адаптивным к потребностям обучающихся.

Интеграция математики и автоматизации расчетов, как единого инструмента инженера, становится базовой составляющей в системе информационно-аналитической подготовки специалистов техносферной безопасности. Авторские методики разработки и применения компьютерных моделей для решения различных задач математического анализа и аналитической геометрии рассматриваются в [24; 25]. Поиску творческих подходов к решению нестандартных математических задач посвящены научные монографии [26; 27]. Концептуальные и эмпирические аспекты процесса постановки математических задач рассмотрены в [28]. Концепция авторов данной работы связана с внедрением автоматизированных расчетов при проведении спасательных операций и рассмотрением различных сценариев оперативного реагирования.

1. Методы и принципы исследования

При решении практических задач техносферной безопасности аналитическими методами отрабатываются умения применять формулы, свойства, теоремы, правила при выборе рациональных решений. В исследовании фокус внимания смещен на инженерные расчеты с использованием математического пакета Mathcad.

Рассмотрим задачу техносферной безопасности по оперативной ликвидации последствий аварийной ситуации, поиска пропавших без вести членов экипажа судна, в условиях ухудшения видимости.

Постановка задачи. Чрезвычайная ситуация (ЧС) техногенного характера, смоделированная в рамках проведения межведомственного опытно-исследовательского учения «Безопасная Арктика», рассматривается в российском городе Мурманске. Город расположен за Северным полярным кругом на восточном побережье Кольского залива Баренцева моря. Смоделированная ЧС произошла на Федеральном государственном унитарном предприятии (ФГУП) «Атомфлот», известном как Росатомфлот (предприятие по эксплуатации и обслуживанию атомного гражданского ледокольного флота России для хозяйственного освоения Северного морского пути).

Описание смоделированной чрезвычайной ситуации техногенного характера. В процессе проведения работ по выгрузке транспортного упаковочного комплекта с судна обеспечения «Лотта» («Имандра») на причале № 2 в результате технической неисправности произошел обрыв одного стропа подъемного устройства (строп текстильный ленточный (СТП) 6,0/6000). Транспортный упаковочный комплект задел борт судна обеспечения «Лотта» («Имандра») и упал на бетонное основание пирса. Произошла разгерметизация контейнера с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду с загрязнением пирса и борта судна. Сцепное устройство (тросы, зацепы) упало в воду. Два члена экипажа судна обеспечения выпали за борт (пропали без вести).

Для оперативной ликвидации последствий аварийной ситуации, поиска пропавших без вести членов экипажа, в условиях ухудшения видимости необходимо осветить место аварии. Требуется найти высоту H , на которую целесообразно поднять источник света, чтобы освещенность области, имеющей предположительно форму круга радиуса R , была максимальной.

Общая характеристика и теоретические основы математической модели. Решение задачи связано с оптимизационной моделью и раскрывает возможности использования инженерных расчетов.

Решение. Для составления математической модели воспользуемся формулой освещенности.

Известно, что освещенность прямо пропорциональна синусу угла падения лучей света на освещаемую площадку и обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника света, то есть

$$E = \frac{\theta \sin \varphi}{H^2 + R^2}, \quad (1)$$

где E — освещенность на границе рассматриваемой области; θ — число, характеризующее мощность источника света; H — расстояние от источника света до центра исследуемой площадки.

Требуется найти высоту H , на которую целесообразно поднять источник света, чтобы освещенность E рассматриваемой области была бы максимальной.

Выразим входящее в формулу (1) значение $\sin \varphi$ через H и R по определению синуса соответствующего угла:

$$\sin \varphi = \frac{H}{\sqrt{H^2 + R^2}}. \quad (2)$$

Подставим полученное выражение (2) в формулу (1) и выполним преобразования, в результате которых формула (1) примет вид

$$E = \frac{\theta H}{(H^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

Учитывая, что значение θ для каждого источника света является постоянным параметром (константа), а также предвидя технические трудности исследования на экстремум, вместо формулы (3) рассмотрим вспомогательную формулу F :

$$F = \frac{1}{\theta^2} E^2 = \frac{H^2}{(H^2 + R^2)^3}. \quad (4)$$

При этом удобно в формулу (4) ввести новую переменную $u = H^2$ и исследовать на экстремум более простую функцию (5):

$$F(u) = \frac{u}{(u + R^2)^3}. \quad (5)$$

Вычислим производную функции (5), применив правила дифференцирования частного

двух функций, сложной функции, табличную формулу для нахождения производной степенной функции.

В результате преобразований получим

$$\begin{aligned}
 F'(u) &= \left(\frac{u}{(u+R^2)^3} \right)' = \\
 &= \frac{(u)'(u+R^2)^3 - u((u+R^2)^3)'}{\left((u+R^2)^3 \right)^2} = \\
 &= \frac{(u+R^2)^3 - 3u(u+R^2)^2}{(u+R^2)^6} = \\
 &= \frac{(u+R^2)^2(u+R^2-3u)}{(u+R^2)^6} = \\
 &= \frac{u+R^2-3u}{(u+R^2)^4} = \frac{R^2-2u}{(u+R^2)^4}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Очевидно, что функция $F(u)$, как и ее производная $F'(u)$, определены при любом значении аргумента u , принимающего по смыслу задачи только положительные значения.

Для нахождения критических точек приравняем производную исследуемой функции к нулю:

$$\begin{aligned}
 F'(u) = 0, \quad R^2 - 2u = 0, \\
 2u = R^2, \quad u = \frac{R^2}{2}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Учитывая, что $u = H^2$, возвратившись к переменной H и выполнив преобразования, получим выражение, содержащее R :

$$H^2 = \frac{R^2}{2}, \quad H = \frac{R}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}R. \quad (8)$$

Найдена точка, подозрительная на экстремум:

$$H = \frac{\sqrt{2}}{2}R. \quad (9)$$

2. Результаты

Покажем, что для функции, выражающей зависимость высоты источника света от радиуса исследуемой области, полученное значение H будет точкой максимума. Для этого убеждаемся, что слева от этой точки производная принимает только положительные значения, а справа все ее значения отрицательны, то есть при переходе через найденную точку знак производной меняется с «+» на «-». Результаты вычислений и теоретических выводов представлены в обобщенной форме на рис. 1.

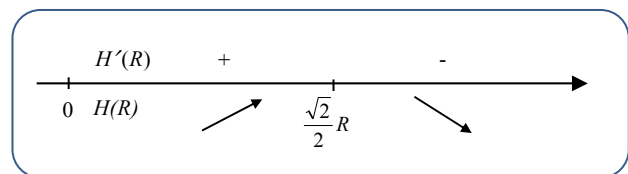


Рис. 1. Применение метода интервалов
Источник: выполнено Т.А. Селеменовой.

Figure 1. Application of the interval method
Source: by T.A. Selemeneva.

В результате инженерных расчетов можно сделать вывод о том, что максимальная освещенность рассматриваемой площадки, имеющей форму круга радиуса R , будет достигаться при размещении источника света на высоте:

$$H = \frac{\sqrt{2}}{2}R. \quad (10)$$

Уточним значение тангенса угла наклона лучей света к поверхности, соответствующего найденной оптимальной высоте расположения осветительного прибора:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{H}{R} = \frac{\sqrt{2}}{2}. \quad (11)$$

Ответ: для оперативной ликвидации последствий аварийной ситуации в условиях ухудшения видимости, чтобы освещенность области, имеющей форму круга радиуса R , была максимальной, целесообразно поднять

источник света на высоту $H = \frac{\sqrt{2}}{2}R$.

Рассмотрим решение задачи на рабочем листе Mathcad. Для нахождения критических точек используем функцию **Find**. Листинг решения приведен на рис. 2, графики функций представлены на рис. 3 и 4.

Используя математический аппарат дифференциального исчисления в инженерных расчетах, будущие специалисты техносферной безопасности переносят оптимизационную математическую модель на рабочий лист Mathcad и, применяя операторы дифференцирования,

$$F(u) := \frac{u}{(u + R^2)^3}$$

$$F(u) := \frac{d}{du} F(u) \quad F(u) \rightarrow \frac{1}{(R^2 + u)^3} - \frac{3u}{(R^2 + u)^4}$$

$$F(u) \rightarrow \frac{1}{(R^2 + u)^3} - \frac{3u}{(R^2 + u)^4} \text{ simplify} \rightarrow \frac{R^2 - 2u}{(R^2 + u)^4}$$

Given
 $F(u) = 0$
 Find(u) $\rightarrow \frac{R^2}{2}$

Рис. 2. Листинг нахождения критических точек
 Источник: выполнено Е.Н. Трофимец.

Figure 2. Listing of critical points
 Source: by E.N. Trofimets.

вычисляют производные, находят критические точки, строят графики функции на рабочих листах Mathcad и MS Excel.

С использованием инструментов построения графиков функции в Mathcad исследуется поведение функции $F(u)$ с различными значениями R .

С помощью трассировки определяют точки экстремума и границы R . Анализ графиков функций в Mathcad и MS Excel позволяет сделать вывод, что $H = 0,343$ при $R = 0,485$.

$$R1 := 0,484 \quad R2 := 0,500 \quad R3 := 0,585 \quad R4 := 0,780$$

$$F1(u) := \frac{u}{(u + R1^2)^3} \quad F2(u) := \frac{u}{(u + R2^2)^3} \quad F3(u) := \frac{u}{(u + R3^2)^3} \quad F4(u) := \frac{u}{(u + R4^2)^3}$$

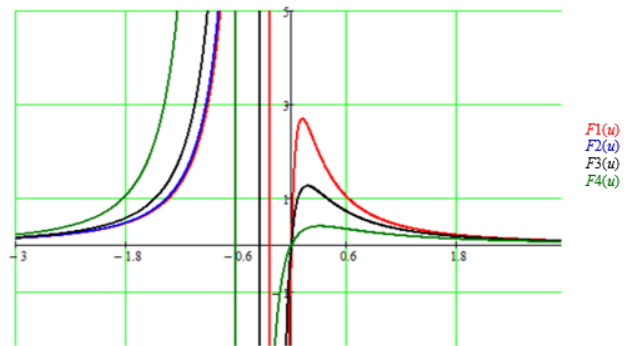


Рис. 3. Графики функций в Mathcad при разных значениях R
 Источник: выполнено Е.Н. Трофимец.

Figure 3. Graphs of functions in Mathcad for different values of R
 Source: by E.N. Trofimets.

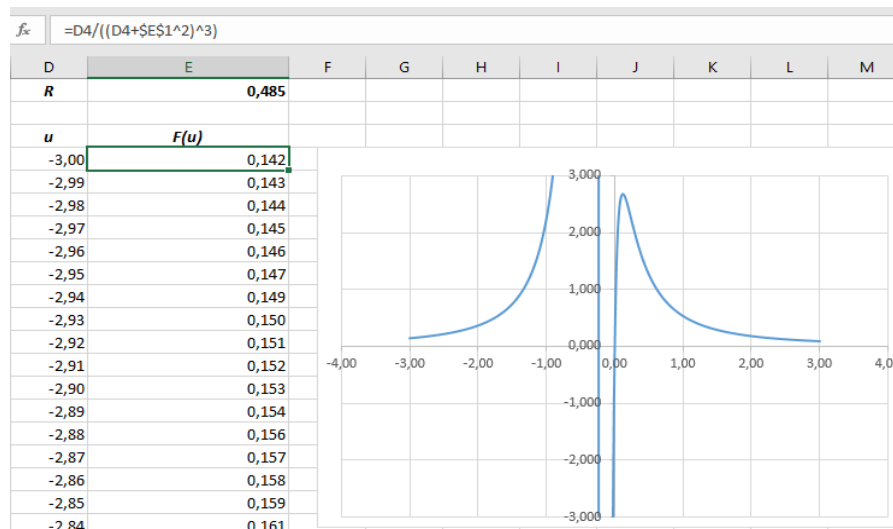


Рис. 4. График функции в MS Excel для $R = 0,485$ / **Figure 4.** Graph of the function in MS Excel for $R = 0.485$
 Источники: выполнено Е.Н. Трофимец. / Source: by E.N. Trofimets.

Представленная задача является одним из элементов банка профессионально ориентированных задач, входящих в лабораторный практикум по решению задач техносферной безопасности с использованием методов высшей математики и информационных технологий. В свою очередь, разработанный практикум является одним из дидактических компонентов математического модуля, входящего в состав системы информационно-аналитической подготовки инженеров техносферной безопасности.

Разработанные задачи отражают содержательные особенности методики формирования нормативных компетенций в процессе математической, естественнонаучной, общепрофессиональной и информационной подготовки будущих специалистов в области техносферной безопасности. Они прошли апробацию в образовательном процессе Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева.

3. Обсуждение

Эффективность автоматизации инженерных расчетов в системе информационно-аналитической подготовки специалистов техносферной безопасности будет повышаться за счет технологии цифрового следа, а именно отслеживания всей цепочки расчетных решений (какие исходные данные использовались, как менялись параметры в процессе итераций, кто и когда вносил корректировки). Фундаментом для любых инженерных расчетов в техносферной безопасности являются классические методы и только потом перенос в цифру (алгоритмизация ручных расчетов, создание цифровых шаблонов, интеграция в специализированное ПО).

Для автоматизации инженерных расчетов использовались табличный процессор MS Excel и программная среда Mathcad. Потенциал Excel очевиден — он имеет широкий набор встроенных функций и программных надстроек, которые можно использовать для проведения разнообразных инженерных расчетов. В частности, встроенный функционал Excel позволяет эффек-

тивно решать оптимизационные задачи, проводить анализ «что-если» (сценарный анализ), разведочный анализ данных, дисперсионный анализ, регрессионный анализ, анализ временных рядов и др. Кроме того, Excel имеет развитые средства интеграции с различными источниками данных и поддерживает VBA, что позволяет расширять его функциональные возможности. Все это обусловило выбор Excel в качестве базовой инструментальной среды для разработки цифровых шаблонов и автоматизации инженерных расчетов [29–31].

Функционал математического пакета Mathcad хорошо дополняет функционал табличного процессора MS Excel по тем аспектам, которые в Excel не представлены и требуют дополнительно программирования на VBA. Например, Mathcad целесообразно использовать в тех случаях, когда инженерные расчеты сопряжены с дифференциальными и интегральными исчислениями. Кроме того, Mathcad является более предпочтительным при проведении сложных критически важных расчетов, связанных с безопасностью (например, расчет нагрузок на конструкции, моделирование аварийных сценариев на опасных производственных объектах, расчет параметров систем безопасности и др.) [31].

Выбор именно Mathcad, а не других математических пакетов (например, Matlab, Mathematica) обусловлен тем, что формулы в данном математическом пакете вводятся «естественно», как на бумаге, а также имеются встроенные средства работы с различными единицами измерения, что является очень удобным и понятным для инженеров.

Таким образом, оба рассмотренных программных инструмента имеют свои преимущества и недостатки. Excel проще и более универсален при разработке разнообразных цифровых шаблонов инженерных расчетов. Mathcad же является инструментом для реализации более сложных математических моделей. Excel и Mathcad хорошо дополняют друг друга, что подтверждает практика их использования в образовательном процессе инженеров техносферной безопасности. Вместе они позволяют целе-

направленно фокусировать внимание обучающихся на проблемные ситуации, для разрешения которых эффективно применяются как классические методы, так и современные методы анализа данных и машинного обучения [32–34]. Кроме того, их использование значительно расширяет спектр рассматриваемых инженерных задач, усиливает тенденцию интеграции универсальных и общепрофессиональных компетенций с профессиональными.

Заключение

В работе исследовалась проблема оперативного реагирования по принятию мер спасательной операции в рамках рассмотрения смоделированной чрезвычайной ситуации на ФГУП «Атомфлот». В рамках проведенного исследования предложена методика по нахождению оптимальной высоты источника света в условиях плохой видимости для освещенности области спасательной операции. Оригинальная идея методики базируется на дифференциальном исчислении и сравнительном анализе графиков функций, полученных оперативной автоматизацией расчета.

Результаты методики позволяют:

- автоматизировать анализ множества сценариев развития чрезвычайных ситуаций;
- визуализировать компромиссы и риски через сравнительные графики;
- выбирать оптимальные параметры реагирования;
- генерировать конкретные оперативные рекомендации;
- использовать автоматический выбор оптимальной стратегии спасательных работ;
- применять полученные сценарии в профессиональной деятельности инженеров техносферной безопасности и спасателей.

Научная новизна работы заключается в синтезе методов автоматизации расчетов и сравнительного анализа графиков функций для принятия оперативного решения по спасательной операции.

Автоматизация инженерных расчетов в сфере техносферной безопасности является одним из ключевых факторов повышения эффек-

тивности как профессиональной деятельности, так и образовательного процесса. Внедрение современных цифровых инструментов способствует подготовке высококвалифицированных специалистов, способных быстро и точно решать задачи в области безопасности технологических процессов и производств.

Современные подходы в инженерных расчетах делают акцент на визуализации, персонализации и связи с практикой через программирование. Перспективы автоматизации инженерных расчетов связаны с тотальной интеграцией искусственного интеллекта (ИИ), разработкой цифровых двойников и внедрением квантовых вычислений. Успех такой трансформации зависит от решения ключевых challenges: преодоления цифрового разрыва, переподготовки преподавательского состава и сохранения человеческого фактора в системе информационно-аналитической подготовки специалистов техносферной безопасности.

Список источников

1. Смирнов Е.И., Попова Т.С. Модель формирования самостоятельной деятельности школьников при углубленном обучении математике в цифровой образовательной среде // *Continuum. Математика. Информатика. Образование*. 2022. № 2 (26). С. 57–68. <https://doi.org/10.24888/2500-1957-2022-2-57-68> EDN: SLVEQE
2. Тестов В.А. О некоторых методологических особенностях цифровой трансформации обучения математике // *Материалы 42-го Международного научного семинара преподавателей математики и информатики университетов и педагогических вузов «Математика и математическое образование: проблемы, технологии, перспективы»*. Смоленск, 2023. С. 27–30. EDN: SXCNCM
3. Тестов В.А. О преподавании математики в условиях цифровой трансформации обучения // *Материалы II Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения видного российского математика Д.А. Граве «Математика в современном мире»*. Вологда, 2023. С. 156–160. EDN: KZNZFF
4. Постолит А.В. Цифровизация учебного процесса на базе автономных приложений и интерактивных образовательных платформ // *Математика и ее приложение в науке и образовании: материалы Межвузовской научно-методической конференции с международным участием*. Санкт-Петербург, 2025. С. 268–275. EDN: OCPNLP

5. Трофимец Е.Н. Преподавание математических дисциплин в условиях развития цифровой образовательной среды // Психолого-педагогические проблемы безопасности человека и общества. 2022. № 2 (55). С. 39–43. EDN: COEFMT
6. Trofimets E.N., Trofimets A.A. Digital technologies in mathematical education // European proceedings of social and behavioural sciences EPSBS. Krasnoyarsk, Russia. 2021. Vol. 116. P. 1506–1512. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2021.09.02.168> EDN: VWGEMX
7. Семенов А.Л., Абылкасымова А.Е., Поликарпов С.А. Основания математического образования в цифровой век // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2023. Т. 511. № 1. С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S2686954323700157> EDN: RQEWAB
8. Абрамов В.И., Маланичева Н.В., Стрельникова И. А. Цифровые технологии в управлении образованием сквозь призму опыта зарубежных стран // Научно-педагогическое обозрение (Pedagogical Review). 2022. № 4 (44). С. 48–61. <https://doi.org/10.23951/2307-6127-2022-4-48-61>
9. Абылкасымова А.Е., Шишов С.Е., Жумалиева Л.Д. О теории модернизации цифрового образования, формирующего множественность идентичности и интеллект обучающихся // Научные исследования и разработки. Социально-гуманитарные исследования и технологии. 2023. Т. 12. № 3. С. 3–16. <https://doi.org/10.12737/2306-1731-2023-12-3-3-16> EDN: MQHVAR
10. Лукин В.Н., Папырина Е.В., Козут В.Г. Управление проектной деятельностью в цифровой образовательной среде университета // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2022. № 2. С. 144–153. EDN: DMFEWF
11. Суртаева О.С. Цифровизация в системе инновационных стратегий в социально-экономической сфере и промышленном производстве : монография. 4-е изд. Москва : Дашков и К, 2023. 154 с. ISBN 978-5-394-05249-1
12. Миронова Л.И., Шатыбелко М.П. Современные подходы к инженерно-строительному образованию в контексте цифровой трансформации отрасли // Наука и практика в образовании: электронный научный журнал. 2025. Т. 6. № 1. С. 36–44. https://doi.org/10.54158/27132838_2025_6_1_36 EDN: YKQRXU
13. Шеленаева А.Х. Цифровая трансформация системы высшего образования: направления и риски // Открытое образование. 2023. Т. 27. № 4. С. 42–51. <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2023-4-42-51> EDN: UPTUSJ
14. Dvoryatkina S.N., Zhuk L.V., Smirnov E.I., Shcherbatykh S.V. Development managing stages of hybrid intelligent learning environment for student's mathematics research activities // Perspectives of Science and Education. 2023. Vol. 2. No. 62. P. 174–190. <https://doi.org/10.32744/pse.2023.2.10> EDN: OYOECW
15. Дворяткина С.Н., Каранетян В.С., Розанова С.А. Множественность целеполагания в педагогической деятельности: математика на шахматной доске // Высшее образование в России. 2019. Т. 28. № 4. С. 81–92. <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-4-81-92> EDN: ZCRJYT
16. Dvoryatkina S.N., Dallakyan A.M., Smirnov E.I., Karapetyan V.S., Rozanova S.A. Synergetic effects manifestation by founding complexes deployment of mathematical tasks on the chessboard // Problems of Education in the 21st Century. 2019. Vol. 77. No. 1. P. 8–21. <https://doi.org/10.33225/PEC/19.77.08> EDN: MKWELG
17. Смирнов Е.И., Дворяткина С.Н., Щербатых С.В. Интеллектуальное управление в математическом моделировании исследовательской деятельности школьников // Continuum. Математика. Информатика. Образование. 2020. № 3 (19). С. 48–61. <https://doi.org/10.24888/2500-1957-2020-3-48-61> EDN: LJVXDR
18. Shcherbatykh S.V., Lykova K.G. Improving the efficiency of mathematics education through the development of a stochastic worldview of students // International Journal of Instruction. 2022. Vol. 13. No. 2. P. 1057–1074. <https://doi.org/10.29333/iji.2022.15258a> EDN: CYCIZA
19. Дворяткина С.Н., Мкртчян М.А., Розанова С.А. Духовно-нравственный эффект как результат интеграции математического и гуманитарного знания в высшей школе // Интеграция образования. 2018. Т. 22. № 2. С. 353–368. <https://doi.org/10.15507/1991-9468.091.022.201802.353-368> EDN: XROLQT
20. Morgacheva N., Sotnikova E., Shcherbatykh S., Shcherbatykh L. Interactive technologies of teaching disciplines of the natural science cycle as a means of forming a socially adapted student's personality // Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education. Krasnoyarsk, Russia, 2022. Vol. 2647. Article no. 20011. <https://doi.org/10.1063/5.0104364> EDN: LLBPKM
21. Селеменова Т.А., Лаушкин А.А. Практико-ориентированные задачи как средство формирования компетенций в вузе ГПС МЧС России // Труды Всероссийской научно-практической конференции. Пожарная безопасность: Современные вызовы. Проблемы и пути решения. Санкт-Петербург, 2022. С. 161–164. EDN: FTLKFB
22. Pepin B., Gueudet G., Choppin J. Handbook of digital resources in mathematics education. Springer Publ., 2024. 1405 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-95060-6>
23. Clements M.A., Kaur B., Lowrie T., Mesa V., Prytz J. Fourth international handbook of mathematics education. Springer Publ., 2024. 822 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51474-6>

24. Nodelman V. Mathematics studies through technology: Precalculus, calculus, and more. World Scientific, 2025. 620 p. ISBN 981129013X, 9789811290138
25. Voskoglou M.Gr., Stiles J.M. Advances in mathematics education research. Nova Science Publ., 2024. 265 p. ISBN-13 979-8891139640
26. Jenlink P.M. Mathematics as the science of patterns: Making the Invisible visible to students through teaching. Information Age Publ., 2022. 266 p. ISBN-10 164802744X
27. Boaler J. Math-ish: Finding Creativity, Diversity, and Meaning in Mathematics. HarperOne Publ., 2024. 304 p. ISBN-13 978-0063340800
28. Baumanns L. Mathematical problem posing: Conceptual considerations and empirical investigations for understanding the process of problem posing. Springer Publ., 2022. 299 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-39917-7>
29. Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Research of numerical methods for solving ordinary differential equations in MS Excel // Journal of physics: conference series. 2020. Vol. 1691. Article no. 12049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012049> EDN: ELHRZK
30. Дорж О. Некоторые возможности применения Microsoft Excel при решении задач по теоретической механике // Молодой ученый. 2023. № 18. С. 234–238. EDN: OTHVLB
31. Петров Г.Н., Евграфов А.Н. Визуализация расчетов в программах Excel и Mathcad // Современное машиностроение: Наука и образование. 2025. № 14. С. 55–70. EDN: YEWOYO
32. Pham T., Nguyen T.B., Ha S., Nguyen Ngoc N.T. Digital transformation in engineering education: Exploring the potential of AI-assisted learning // Australasian Journal of Educational Technology. 2023. Vol. 39. No. 5. P. 1–19. <https://doi.org/10.14742/ajet.8825>
33. Daniel I., Abhijith G.R., Kutz J.N., Ostfeld A., Cominola A. Physics-informed machine learning for universal surrogate modelling of water quality parameters in water distribution networks // Engineering Proceedings. 2024. Vol. 69. No. 1. Article no. 205. <https://doi.org/10.3390/engproc2024069205>
34. de Payrebrune K.M., Flaßkamp K., Ströhla T., Sattel T., Bestle D., Röder B, et al. The impact of AI on engineering design procedures for dynamical systems // Technische Mechanik. 2025. Vol. 45. No. 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.24352/UB.OVGU-2025-037>
2. Testov VA. On some methodological features of the digital transformation of teaching mathematics. *Mathematics and Mathematical Education: Challenges, Technologies, and Prospects. Proceedings of the 42nd International Scientific Seminar for Teachers in Mathematics and Computer Science from Universities and Pedagogical Higher Education Institutions*. 2023 Oct 12–14; Smolensk: Smolensk State University; 2023. p. 27–30. (In Russ.) EDN: SXCNCM
3. Testov VA. Teaching Mathematics in the Context of the Digital Transformation of Education. *Mathematics in the modern world. Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 160th anniversary of the birth of the prominent Russian mathematician D.A. Grave*. September 19–23, 2023. Vologda: Vologda State University Publ.; 2023. p. 156–160. (In Russ.) EDN: KZNFZ
4. Postolit AV. Digitalization of the educational process based on offline applications and interactive educational platforms. *Mathematics and its application in science and education. Proceedings of the Interuniversity Scientific and Methodological Conference with International participation*. May 29, 2025. St. Petersburg, 2025. p. 268–275. (In Russ.) EDN: OCPNLP
5. Trofimets EN. Teaching mathematical disciplines in context of development of a digital educational environment. *Psychological and Pedagogical Issues in the Security of the Individual and Society*. 2022;2(55):39–43. (In Russ.) EDN: COEFMT
6. Trofimets EN, Trofimets AA. Digital technologies in mathematical education. *European proceedings of social and behavioural sciences EPSBS*. Krasnoyarsk, Russia. 2021;116:1506–1512. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2021.09.02.168> EDN: VWGEMX
7. Semenov AL, Abylkasymova AE, Polikarpov SA. Foundations of mathematical education in the digital age. *Doklady Mathematics. Mathematics, Computer Science, Control Processes*. 2023;511(1):3–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2686954323700157> EDN: RQEWAB
8. Abramov VI, Malanicheva NV, Strelnikova IA. Digital technologies in education management through the prism of foreign countries' experience. *Scientific and Pedagogical Review (Pedagogical Review)*. 2022;4(44): 48–61. <https://doi.org/10.23951/2307-6127-2022-4-48-61>
9. Abylkasymova AE, Shishov SE, Zhumalieva L. On the theory of modernization of digital education, which forms the plurality of identities and the intellect of students. *Scientific Research and Development. Socio-Humanitarian Research and Technology*. 2023;12(3):3–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/2306-1731-2023-12-3-3-16> EDN: MQHVAP
10. Lukin VN, Papyrina EV, Kogut VG. Project management in the digital educational environment of the university. *Scientific and Analytical Journal "Vestnik Saint-Petersburg University of state Fire Service of*

Emercom of Russia". 2022;(2):144–153. (In Russ.) EDN: DMFEWF

11. Surtaeva OS. *Digitalization in the system of innovative strategies in the socio-economic sphere and industrial production*. The monograph. 4th ed. Moscow: Dashkov and K; 2023. (In Russ.) ISBN 978-5-394-05249-1

12. Mironova LI, Shatybelko MP. Modern approaches to civil engineering education in the context of digital transformation of the industry. *Science and Practice in Education: Electronic Scientific Journal*. 2025;6(1):36–44. (In Russ.) https://doi.org/10.54158/27132838_2025_6_1_36 EDN: YKQRXU

13. Shelepaeva AKh. Digital transformation of the higher education system: Directions and risks. *Open Education*. 2023;27(4):42–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2023-4-42-51> EDN: UPTUSJ

14. Dvoryatkina SN, Zhuk LV, Smirnov EI, Shcherbatykh SV. Development managing stages of hybrid intelligent learning environment for student's mathematics research activities. *Perspectives of Science and Education*. 2023;2(62):174–190. <https://doi.org/10.32744/pse.2023.2.10> EDN: OYOECW

15. Dvoryatkina SN, Karapetyan VS, Rozanova SA. The plurality of goal-setting in pedagogical activity: Integration of mathematics on a chessboard. *Higher Education in Russia*. 2019;28(4):81–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-4-81-92> EDN: ZCRJYT

16. Dvoryatkina SN, Karapetyan VS, Dallakyan AM, Rozanova SA, Smirnov EI. Synergetic effects manifestation by founding complexes deployment of mathematical tasks on the chessboard. *Problems of Education in the 21st Century*. 2019;77(1):8–21. <https://doi.org/10.33225/PEC/19.77.08> EDN: MKWELG

17. Smirnov EI, Dvoryatkina SN, Shcherbatykh SV. Intellectual management in mathematical modeling of students' research activities. *Continuum. Mathematics. Computer Science. Education*. 2020;3(19):48–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.24888/2500-1957-2020-3-48-61> EDN: LJVXDR

18. Shcherbatykh SV, Lykova KG. Improving the efficiency of mathematics education through the development of a stochastic worldview of students. *International Journal of Instruction*. 2022;15(2):1057–1074. <https://doi.org/10.29333/iji.2022.15258a> EDN: CYCIZA

19. Dvoryatkina SN, Mkrtchyan MA, Rozanova SA. Spiritual and moral effect as the result of integration of mathematical with humanitarian knowledge at universities. *Integration of Education*. 2018;22(2):353–368. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/1991-9468.091.022.201802.353-368> EDN: XROLQT

20. Morgacheva N, Sotnikova E, Shcherbatykh S, Shcherbatykh L. Interactive technologies of teaching disciplines of the natural science cycle as a means of forming

a socially adapted student's personality. *Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education*. Krasnoyarsk, Russia, 2022;2647:20011. <https://doi.org/10.1063/5.0104364> EDN: LLBPKM

21. Selemeneva TA, Laushkin AA. Practice-oriented tasks as a means of forming competencies at the university of state fire service of emercom of Russia. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Fire Safety: Modern Challenges. Problems and Solutions*. Saint-Petersburg, 2022. P. 161–164. (In Russ.) EDN: FTLKFB

22. Pepin B, Gueudet G, Choppin J. *Handbook of digital resources in mathematics education*. 0th ed. Springer Publ.; 2024. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-95060-6>

23. Clements MA, Kaur B, Lowrie T, Mesa V, Prytz J. *Fourth international handbook of mathematics education*. Springer Publ.; 2024. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51474-6>

24. Nodelman V. *Mathematics studies through technology: Precalculus, calculus, and more*. World Scientific Publ.; 2025. ISBN 981129013X, 9789811290138

25. Voskoglou MGr, Stiles JM. *Advances in mathematics education research*. Nova Science Publ.; 2024. ISBN-13 979-8891139640

26. Jenlink PM. *Mathematics as the science of patterns: Making the Invisible visible to students through teaching*. Information Age Publ.; 2022. ISBN-10 164802744X

27. Boaler Jo. *Mathish: Finding creativity, diversity, and meaning in mathematics*. HarperOne Publ.; 2024. ISBN-13 978-0063340800

28. Baumanns L. *Mathematical problem posing: Conceptual considerations and empirical investigations for understanding the process of problem posing*. Springer Spektrum Wiesbaden; 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-39917-7>

29. Trofimets EN, Trofimets VYa. Research of numerical methods for solving ordinary differential equations in MS Excel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1691:12049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012049> EDN: ELHRZK

30. Dorj O. Some applications of Microsoft Excel in solving theoretical mechanics problems. *Young Scientist*. 2023;18:234–238. (In Russ.) EDN: OTHVLB

31. Petrov GN, Evgrafov AN. Visualization calculations in Excel and Mathcad. *Modern Mechanical Engineering: Science and Education*. 2025;14:55–70. (In Russ.) EDN: YEWOYO

32. Pham T, Nguyen TB, Ha S, Nguyen Ngoc NT. Digital transformation in engineering education: Exploring the potential of AI-assisted learning. *Australasian Journal of Educational Technology*. 2023;39(5):1–19. <https://doi.org/10.14742/ajet.8825>

33. Daniel I, Abhijith GR, Kutz JN, Ostfeld A, Cominola A. Physics-informed machine learning for universal surrogate modelling of water quality parameters in water distribution networks. *Engineering Proceedings*. 2024; 69(1):205. <https://doi.org/10.3390/engproc2024069205>

34. de Payrebrune KM, Flaßkamp K, Ströhla T, Sattel T, Bestle D, Röder B, et al. The impact of AI on engineering design procedures for dynamical systems. *Technische Mechanik*. 2025;45(1):1–23. <https://doi.org/10.24352/UB.OVGU-2025-037>

Сведения об авторах

Трофимец Елена Николаевна, кандидат педагогических наук, заведующий кафедрой высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, Российская Федерация, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149; eLIBRARY SPIN-код: 3876-1494, ORCID: 0000-0003-4873-2801; e-mail: ezemifort@inbox.ru

Селеменова Татьяна Александровна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, Российская Федерация, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149; eLIBRARY SPIN-код: 3313-4921, ORCID: 0000-0002-0696-4738; e-mail: tisi11@yandex.ru

About the authors

Elena N. Trofimets, PhD in Education, Head of the Department of Higher Mathematics and System Modeling of Complex Processes, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 149 Moskovsky avenue, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3876-1494, ORCID: 0000-0003-4873-2801; e-mail: ezemifort@inbox.ru

Tatiana A. Selemeneva, PhD in Education, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and System Modeling of Complex Processes, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 149 Moskovsky avenue, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3313-4921, ORCID: 0000-0002-0696-4738; e-mail: tisi11@yandex.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-49-60

EDN: HARDUJ

Научная статья / Research article

Интеграция технологий блокчейн в процессы оптимизации управленческих решений в организационных системах ОПК

Е.А. Маликов[✉], Т.П. Талла Фонганг^{id}, В.В. Пьянков^{id}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ dizel62rus@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 16 июня 2025 г.

Доработана: 21 сентября 2025 г.

Принята к публикации: 5 ноября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Промышленность вступает в новый этап своего технологического развития, связанный с внедрением цифровых технологий в управленческие и производственные процессы. Актуальным становится изучение всех информационных технологий, особенно технологий блокчейна. Цель исследования — изучение наиболее значимых трендов по использованию блокчейн в промышленности. Задачи исследования связаны с анализом особенностей промышленных предприятий, их готовности к цифровой трансформации, экономических эффектов от внедрения технологий, сложностей и преимуществ работы с блокчейн. Изучены изменения в формулировках целей национального развития в направлении цифровизации экономики, приведены индикаторы достижения этих целей до 2030 г. Представлены объемы финансирования предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК) на предстоящий бюджетный трехлетний период до 2027 г. Обозначена проблематика оборонных предприятий, которая может препятствовать внедрению новых технологий: особые требования к надежности, точности, безопасности передачи информации, необходимость изменения бизнес-моделей ведения бизнеса, постоянный реинжиниринг бизнес-процессов, слабая заинтересованность в продвижении технологий блокчейн на всех этапах их внедрения. Обобщены преимущества внедрения блокчейн: экономия временных и стоимостных затрат на поиск контрагентов, улучшение качества получаемой информации, возможность развития собственных цифровых платформ на предприятиях и др. Выявлены несколько ключевых направлений развития блокчейн-технологий в промышленности.

Ключевые слова: оборонно-промышленный комплекс, промышленность, затраты, экономия

Вклад авторов

Маликов Е.А. — концепция, методология исследования, анализ предметной области, написание текста; Талла Фонганг Т.П. — участие в анализе и систематизации материалов, подготовка отдельных разделов статьи, обсуждение полученных результатов; Пьянков В.В. — участие в разработке структуры статьи, анализ и обобщение результатов, редактирование текста. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Маликов Е.А., Талла Фонганг Т.П., Пьянков В.В. Интеграция технологий блокчейн в процессы оптимизации управленческих решений в организационных системах ОПК // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 49–60. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-49-60> EDN: HARDUJ

© Маликов Е.А., Талла Фонганг Т.П., Пьянков В.В., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Integration of Blockchain Technologies into Managerial Decision-Making Optimization in Organizational Systems of the Defense Sector

Evgeny A. Malikov[✉], Thierry P. Talla Fongang[✉], Valeriy V. Pyankov[✉]

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ dizel62rus@yandex.ru

Article history

Received: June 16, 2025

Revised: September 21, 2025

Accepted: November 5, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. Industry is entering a new stage of technological development characterized by the integration of digital technologies into management and production processes. In this context, the study of information technologies, particularly blockchain, has become increasingly relevant. The purpose of this study is to examine the most significant trends in the application of blockchain technologies in industry. The objectives include analyzing the specific features of industrial enterprises, assessing their readiness for digital transformation, evaluating the economic effects of technology adoption, and identifying both the challenges and advantages associated with blockchain implementation. The study reviews changes in the formulation of national development goals toward greater economic digitalization and presents indicators for achieving these targets by 2030. It also considers the planned funding allocations for defense industry enterprises within the upcoming three-year budget cycle through 2027. The study identifies several challenges that may hinder the adoption of new technologies in defense enterprises, including stringent requirements for reliability, accuracy, and information security; the need to transform business models; continuous business process reengineering; and limited interest in promoting blockchain technologies at all stages of implementation. At the same time, the advantages of blockchain integration are summarized, such as reduced time and costs in identifying counterparties, improved information quality, and opportunities to develop proprietary digital platforms within enterprises. Finally, the study outlines several key directions for the further development of blockchain technologies in industry.

Keywords: military-industrial complex, industry, costs, savings

Authors' contribution

Malikov E.A. — conceptualization, research methodology, domain analysis, manuscript preparation; *Talla Fongang T.P.* — analysis and systematization of materials, drafting of specific sections of the manuscript, discussion of the results; *Pyankov V.V.* — development of the manuscript structure, analysis and synthesis of the results, and manuscript editing. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Malikov EA, Talla Fongang TP, Pyankov VV. Integration of blockchain technologies into managerial decision-making optimization in organizational systems of the defense sector. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):49–60. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-49-60> EDN: HARDUJ

Введение

В настоящее время из-за изменений в глобальной экономике требуется ускоренное развитие экономики страны, что достигается применением цифровых технологий в управлении

и в производственных процессах в промышленности. В Указе Президента РФ от 07.05.2024 г. № 309¹ уточнены национальные цели развития страны, целевые показатели и задачи, выполнение которых характеризует достижение национальных целей к 2030 году:

¹ Указ Президента РФ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» от 07.05.2024 г. № 309. URL: <https://minek.rk.gov.ru/documents/77bccce-fee7-4cae-b98b-8e3e5fffd454> (дата обращения: 20.05.2025).

■ рост плотности роботизации должен обеспечить место России среди 25 ведущих стран по данному показателю;

■ Россия должна достичь технологической независимости за счет достижений в сфере цифровой трансформации и искусственного интеллекта;

■ по отношению к 2022 г. объем выпуска продукции в обрабатывающей промышленности должен увеличиться в 1,4 раза;

■ основным критерием достижения «цифровой зрелости» государственного и муниципального управления, ключевых отраслей экономики должно стать управление большей частью транзакций на отраслевых цифровых платформах.

Цифровая трансформация промышленности предполагает, что производственные процессы должны быть переведены на новый технологический уклад, что включает внедрение передовых цифровых технологий и автоматизированных систем. В соответствии с Указом Президента Российской Федерации главной задачей цифровой трансформации промышленности является модернизация управления производственными процессами, что должно привести к значительному росту производительности труда и добавленной стоимости в производственном секторе экономики. Немалая роль в цифровизации экономики отводится предприятиям оборонного сектора.

Цель исследования — выявление ценности внедрения технологий блокчейна в деятельность предприятий оборонно-промышленного комплекса. Задачи исследования связаны с изучением особенностей промышленного производства на современном этапе, готовности промышленности к цифровизации экономики, особенностей и преимуществ технологий блокчейн, условий внедрения, препятствий к внедрению, разработке рекомендаций к продвижению технологий блокчейна на предприятиях

ОПК. Согласно концептуальной модели [1], блокчейн представляет собой фундаментальную инфраструктуру доверия нового поколения, что делает ее применимой в управлении критически важными отраслями, включая ОПК.

1. Материалы и методы

Теоретической и эмпирической основой исследования послужили научные публикации российских исследователей (2018–2024 гг.), официальные статистические данные Росстата, данные Минпромторга РФ и Минобороны РФ, а также законодательные и программные документы, в том числе Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309² и Федеральный закон от 30.11.2024 № 419-ФЗ³. Для достижения целей исследования были применены следующие методологические подходы:

Метод системного анализа: применялся для выявления взаимосвязей между уровнями цифровизации и эффективностью принимаемых управленческих решений в ОПК;

Монографический метод: использовался для анализа нормативных документов и литературных источников.

Экономико-статистические методы: служили инструментом для обобщения показателей финансирования ОПК, оценки эффектов цифровизации и построения обобщающих таблиц.

Комплексный подход: позволил обобщить результаты теоретического и практического анализа в единую модель предпосылок внедрения блокчейн-технологий в управленческие процессы ОПК.

2. Результаты и обсуждение

Промышленность является флагманом отечественной экономики, в том числе, по данным Росстата, в обрабатывающей промышленности на конец 2021 г. более 70 % предприятий

² Указ Президента РФ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» от 07.05.2024 г. № 309. URL: <https://minek.rk.gov.ru/documents/77bccsccce-fee7-4cae-b98b-8e3e5fffd454> (дата обращения: 20.05.2025).

³ Федеральный закон от 30 ноября 2024 г. № 419-ФЗ «О федеральном бюджете на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов». URL: <https://base.garant.ru/411024352/> (дата обращения: 20.05.2025).

использовали информационные и коммуникационные технологии [2]. Несмотря на это, уровень цифровизации производственных и управленческих процессов в целом в промышленности низкий.

Л.А. Гамидуллаева, М.П. Киреев привели данные, что объем цифровой экономики едва превышает 2 % ВВП, а от среднемирового уровня плотность роботизации производства в России отстает в 20 раз [3]. Индекс цифровизации экономики, согласно оценкам Института статистических исследований и экономики знаний Национального исследовательского университета Высшей школы экономики (ИСИЭЗ НИУ ВШЭ), составляет 36 пунктов из 100 пунктов возможных [2]. По данным О.И. Житяевой, еще четыре года назад уровень внедрения цифровых технологий в экономике не достигал и четверти от своего потенциала. В промышленности данный уровень еще ниже, что свидетельствует о значительных пробелах в области цифровизации производственных процессов [4].

Вместе с тем, несмотря на то что российские промышленные компании развиваются в сфере цифровых технологий в соответствии с общемировыми трендами, темпы их внедрения и реализации цифровых инициатив во многом отстают от ведущих стран мира. В частности, это обусловлено различными факторами, включая недостаток финансовых ресурсов, кадровых возможностей и технологической инфраструктуры.

По прогнозам ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, к 2030 г. цифровая трансформация в обрабатывающей промышленности может обеспечить дополнительный рост производительности труда примерно на 20 %, что подчеркивает значительный потенциал цифровизации для улучшения экономических показателей и повышения конкурентоспособности российской промышленности [2].

Текущий момент связан с беспрецедентным увеличением расходов российского бюджета на национальную оборону (13,69 трлн руб. в 2025 г. по сравнению с 10,8 трлн руб. в 2024 г. и 3,5 трлн руб. в 2021 г., а вместе с расходами на

содержание силовых ведомств расходы составят 16,9 трлн руб. в 2025 г. по сравнению с 14,5 трлн руб. в 2024 г.) (табл. 1). Немалая часть этого бюджета планируется на развитие, модернизацию, техническое перевооружение, расширение мощностей оборонных производств и новое промышленное строительство. По линии Министерства промышленности и торговли РФ на реализацию государственной программы Российской Федерации «Развитие оборонно-промышленного комплекса» в 2025 г. выделяется 10,4 млрд руб., 2026 г. — 8,9 млрд руб., 2027 г. — 8,9 млрд руб. Кроме того, что предприятия ОПК получают средства на развитие по другим госпрограммам по линии Министерства промышленности и торговли РФ (всего 1,53 трлн руб., 1,98 трлн руб., 2,21 трлн руб. соответственно на 2025–2026 гг.), по линии Минобороны РФ — 4,2 трлн руб., 2,7 трлн руб., 2,76 трлн руб. соответственно на 2025–2026 гг. (табл. 2).

По этой причине на повестке дня стоят вопросы эффективного использования этих средств, принятия оптимальных управленческих решений по затратам и устойчивому развитию промышленного комплекса. Так, авторы А.С. Алексин, Р.Р. Исупов, И.В. Борзунов подчеркивают, что основой развития промышленных предприятий являются «оценка ключевых аспектов их деятельности, обеспечение устойчивого развития и повышение уровня конкурентоспособности» в условиях неопределенности [5]. По мнению авторов, ключевой особенностью промышленных предприятий должно быть использование высоких технологий, позволяющих конкурировать по уровню технологичности с другими предприятиями в отрасли и в мире. Предприятия ОПК должны принимать решения по определению «узких мест» и решению проблем в области маркетинга (расширение рынков сбыта; повышение доли рынка), производства и сбыта продукции (рост производства), менеджмента (контроль финансовых потоков, экономия затрат) [5].

А.М. Бочкарев считает, что кроме цели извлечения прибыли у промышленных предприя-

тий появляется новая задача — повышение конкурентоспособности путем внедрения и использования новых ИТ-решений, а также пере-

форматирование производства на этой основе для удовлетворения новых требований рынка [6, с. 65].

Таблица 1. Расходы на оборону и силовые ведомства в 2021 и 2024 гг., трлн руб.
Table 1. Expenditures on defense and law enforcement agencies, 2021 and 2024, trillion rub

Год / Year	Нац. оборона / National defense	Силовые ведомства / Law enforcement agencies	Итого / Total
2021	3,5	–	–
2024	10,8	3,7	14,5

Источники: выполнено Е.А. Маликовым / Source: by E.A. Malikov.

Таблица 2. Программы Минпромторга и Минобороны в 2025–2027, млрд и трлн руб.
Table 2. Programs of the Ministry of Industry and Trade and the Ministry of Defense, 2025–2027, billion and trillion rubles

Год / Year	Минпромторг, ОПК, млрд / Ministry of Industry and Trade, defense industry, billion	Госпрограммы Минпромторга, трлн / State programs of the Ministry of Industry and Trade, trillion	Минобороны, развитие ОПК, трлн / Ministry of Defense, development of defense industry, trillion
2025	10,4	1,53	4,2
2026	8,9	1,98	2,7
2027	8,9	2,21	2,76

Источники: выполнено Е.А. Маликовым / Source: by E.A. Malikov.

А.М. Бочкарев считает, что кроме цели извлечения прибыли у промышленных предприятий появляется новая задача — повышение конкурентоспособности путем внедрения и использования новых ИТ-решений, а также реформирование производства на этой основе для удовлетворения новых требований рынка [6, с. 65].

Оборонный сектор по своей природе сильно зависит от надежных, своевременных и точных данных, по утверждению Г.Т. Ермолиной и др. [7]. Гибридные войны и кибератаки сильно увеличили значимость цифровых технологий. Защита, хранение и передача информации в распределенной сети пользователей стали первоочередными задачами предприятий.

Более подробно, оперативно и качественно решать эти задачи помогает цифровая экономика. Одним из значимых достижений в сфере цифровых технологий является технология блокчейн. Т.С. Орлова привела сведения о том, что к 2025 г. объем рынка блокчейна в производ-

стве превысит 26 млрд долл. [8]. Изучена степень распространенности блокчейна в ряде областей: авторство и права владения (более 3 %), технологии финансовые (около 82 %), управление данными (около 2,2 %), операции с товарами и сырьем (не менее 2 %), купля-продажа драгоценных камней (1,5 %), проверка подлинности и подтверждение прав собственности (3 %), промышленность (3 %), частное и государственное управление (0,5 %) и др. [6].

По мнению А.С. Алексинной и др. [5], блокчейн — это ряд взаимосвязанных структурных элементов, отвечающих за хранение информации о распределенной среде транзакций. Это платформа с функциями интеграции, распределения и вычислительных процессов, обмена ресурсами и продуктами, которые предприятия могут применить с целью решения проблем в сфере управления бизнес-процессами.

Есть ряд особенностей блокчейна, применение которых делает возможным создание прозрачной системы управления сделками в реальном секторе экономики [5; 9, с. 113]:

- создается принципиально новый уровень надежности: информация защищена от несанкционированного доступа, так как у потенциальных «взломщиков» системы отсутствуют вычислительные мощности соответствующего уровня;

- каждый блок информации хранит информацию из предыдущего блока. Каждый участник транзакций видит информацию в полном объеме, и только с согласия большинства участников цепи информация может быть изменена или удалена;

- каждая транзакция уникальна и полностью прослеживается всеми участниками отношений, что минимизирует мошенничество в операциях;

- благодаря криптографическим методам обеспечивается надежность информации при передаче и хранении;

- блокчейн-система может встраиваться в другие информационные системы, может надстраиваться новыми модулями, позволяющими анализировать иные бизнес-модели, выявлять причины простоев, поломки оборудования, появления брака и другие процессы;

- блокчейн может применяться к плановым расчетам в поставках ресурсов, контроле прохождения ресурсов по всем стадиям вплоть до производства. Возможно проведение детального аудита транзакций;

- блокчейн-технология эффективна, если она применяется систематически и происходит постоянное накопление информации, повышается возможность выбора наиболее оптимальных (устойчивых, ответственных, с соблюдением нормативных требований) посредников и путей дальнейшего развития, выстраиваются новые условия для ведения конкурентной борьбы;

- блокчейн-технология может экономить управленцам рабочее время на обработку информации, вовремя сокращать избыточные запасы ресурсов, продукции. Технология будет незаменима в вопросах проведения инвента-

ризации активов на предприятии, в складском учете, обеспечении надежности деталей [6];

- один из инструментов блокчейна — смарт-контракт — автоматически исполняет соглашения и контролирует процессы, соблюдая нормативные правовые требования по сертификации продукции и др., автоматически блокирует исполнение контрактов, если обнаружены проблемы по качеству товаров, что снижает риск ошибок [5; 6]. Одним из новшеств в смарт-контрактах является оракул — элемент, расширяющий функционал смарт-контракта, с помощью которого возможно корректировать информацию в смарт-контрактах [10]. Затраты на транзакции (комиссии за перечисления) снизятся за счет оперирования цифровыми активами напрямую и без посредников [10].

Как показывают данные зарубежных исследований, реализация блокчейн-технологий в логистических цепочках позволяет достичь значительного экономического эффекта. По оценкам IBM Institute for Business Value⁵, экономия затрат на ведение документооборота и верификацию данных, поиск поставщиков и заказчиков может достигать 30–40 %. Кроме того, применение таких технологий позволяет сократить время на отслеживание происхождения продукции до 70 %, что особенно важно для предприятий с жесткими требованиями к верификации и прослеживаемости. Анализ показывает, что применение блокчейна в логистике позволяет достичь высокой степени прозрачности, отслеживаемости и синхронизации потоков, что особенно актуально для оборонной промышленности [11].

Эти эффекты подтверждаются международной практикой, в частности примерами внедрения в логистических и производственных цепочках стран Европейского союза и Китая⁶ [11].

Авторы Е.М. Ильинская и др. [12, с. 139] считают, что блокчейн эффективен в двух областях: ведение записей и документации, например, регистрация новых данных, идентификация

⁵ IBM Institute for Business Value. IBM Food Trust: Accelerating Digital Transformation of the Food Supply Chain. IBM Corporation, 2020. URL: <https://www.ibm.com/downloads/cas/6BXGZRX1> (дата обращения: 20.05.2025).

⁶ Там же.

пользователей, smart-контракты, обмен цифровых и физических активов на цифровой платформе, инфраструктура платежей, проверяемые данные.

Н.А. Симченко и др. считают, что блокчейн эффективен для защищенной передачи данных, создания цифровых копий документов, формирования модульного пакета документов, например для упрощения процедур открытия малого бизнеса [13, с. 205].

По Г.Т. Ермолдиной и др., следует различать три типа блокчейна с разными правами регулирования информации в блоках: публичный, частный и консорциумный. Участники цепочек поставок могут сами выбирать тип блокчейна в зависимости от потребности [7].

По мнению А.М. Бочкарева, блокчейн-технологии способны изменить саму бизнес-модель поведения предприятия. В частности, обусловить переход от модели послепродажного обслуживания товара к модели отслеживания максимально возможного срока службы товара, используя при этом предсказательную аналитику [6, с. 64].

По мнению Е.М. Ильинской и др., актуальными становятся цифровые бизнес-модели — это непрерывно повторяющиеся транзакции, которые обрабатываются цифровыми технологиями. Авторы обнаружили следующую закономерность: чем выше уровень сложности задачи обеспечения конкурентоспособности, тем активнее и детальнее должны формироваться трансферные транзакции, бизнес-процессы и сама бизнес-модель [12].

Отдельно следует упомянуть о космической отрасли как важнейшей отрасли ОПК, втянутой в военный конфликт, необходимости обеспечения безопасной передачи данных со спутников Земли, верификации получаемых данных от законного инициатора. Безопасность космической информационной сети, в том числе и в военное время, может быть обеспечена за счет блокчейн-технологий. С 2018 г. в России реализуется проект по проведению в лабораторных условиях анализа возможностей блокчейна на предмет избегания кибератак на важные базы

данных и системы вооружения. Установлено, что с помощью блокчейна значительно ускоряется передача данных со спутников как минимум на треть [7].

По мнению Р.М. Полуэктова, сложно найти замену блокчейн-технологии в отношениях управления интеллектуальной собственностью в ракетно-космической промышленности. Данная технология может лучше обеспечить авторские права на инновационные технологии [14, с. 59].

Во всем мире государственные и частные компании подключились к данной технологии в вопросах защиты объектов интеллектуальной собственности, «улучшения передачи данных и спутниковых снимков, глобально доступной и надежной записи орбитальных положений спутников и логистики и заключения соглашений с другими предприятиями на базе смарт-контрактов» [7].

Т.Г. Ермолдина с соавт. резюмируют о следующей пользе блокчейна в оборонной промышленности и космической индустрии: повышается кибербезопасность процессов, происходит комплексная верификация информации, снижаются риски принятия неоптимальных решений в чрезвычайных ситуациях, увеличивается эффективность оборонной логистики и поставок (закупок) [8].

С.В. Шкодинский, Д.А. Степанов считают большим преимуществом блокчейн для промышленных предприятий, которые являются, как правило, крупными и крупнейшими, его способность обеспечивать анонимность, трансграничность расчетов в обход рисков получения санкций [15].

А.Я. Нестеров, Н.А. Семенов утверждают, что промышленные данные, особенно данные с поточных производств, очень динамичны и трудоемки по сбору информации. Технологии блокчейн частично могут решить проблему, построив новую модель управления на основе достоверных технологических и бизнес-показателей [16, с. 93].

Сложности в применении блокчейна в оборонных предприятиях могут быть связаны с обращением секретной информации и необходи-

мостью более тщательного регулирования режимов обмена секретной информацией, контроля ответственных работников. Исследователи отмечают, что в некоторых типах блокчейна нет централизованного контроля, осуществляется непрерывная совместная эксплуатация и контроль применения базы данных, и речь идет о снижении секретности информации для участников сети [5]. Вместе с тем повышается закрытость информации для третьих лиц.

Р.А. Седунов указал, что блокчейн строится на принципе децентрализации благодаря тому, что в цепи все участники имеют равные права в отношении информации, что обеспечивает ее безопасность. При этом остается риск негативного воздействия на систему в случае создания внутренней закрытой блокчейн-платформы [17]. Р.А. Седунов считает, что открывающиеся возможности использования блокчейн в оборонной промышленности перекрывают вышеназванные негативные явления [17].

А.С. Алексина с соавт. также полагают, что нужно избегать чрезмерного внедрения данных технологий, чтобы не усложнять организационно-управленческую структуру предприятия [5].

Систематизация литературы и нормативных документов позволяет утверждать, что ключевым барьером внедрения технологии блокчейн в ОПК является несогласованность технологических, нормативных и организационных уровней. По нашему мнению, переход к эффективной модели управления возможен при условии разработки отраслевых цифровых стандартов и создания специализированных центров компетенций на базе крупнейших предприятий.

Кроме того, авторы полагают, что успешность внедрения блокчейн зависит не только от экономической эффективности, но и от уровня доверия участников оборонной цепочки к технологии. Следовательно, необходимо формировать институциональную среду, обеспечивающую юридическую и операционную поддержку таких решений.

С учетом рассмотренных особенностей блокчейн-технологий и предприятий промыш-

ленности блокчейн должны применять высокотехнологичные, с длинными и многочисленными производственными цепочками предприятия машиностроения, других обрабатывающих производств, а также предприятия добывающей и перерабатывающей промышленности. И.В. Балиев, А.А. Потапов, И.Р. Авторханов утверждают, что технология блокчейн может быть востребована посредниками между крупными торговыми сегментами [9, с. 116].

Я.А. Нестеров, Н.А. Семенов указали, что участников цепи должно быть много, так как от их числа и интенсивности транзакций зависит производительность и затратность технологий блокчейн. Если же узлов в цепи (участников) будет немного, то упадет производительность и встанет вопрос об устойчивости и безопасности технологии [16].

Непременным условием применимости технологий блокчейн является требование автоматизации всех рабочих мест [6], наличие интернета, мобильных устройств, наличие квалифицированных кадров, обладающих знаниями о специфике производства, информационных технологиях, цифровом маркетинге [18, с. 260], заинтересованность руководителей в использовании эффективных технологий, поддержка со стороны государства в реализации технологий четвертого уровня индустрии. Л.П. Васильева утверждает, что предприятия, более оперативно внедряющие цифровые технологии в управление, оперирующие большими данными, предсказывающие и предупреждающие риски, изменяющие операционные модели, структуру затрат, быстрее повышают свою конкурентоспособность, корректируя свой рыночный курс [18].

Препятствиями к внедрению технологий блокчейн в промышленности является противодействующее организационное поведение клиентов, которые не спешат апробировать новые цифровые сервисы, поведение самих предприятий, которые не торопятся переводить пилотные проекты в масштабную деятельность. Хотя, как отмечает Л.П. Васильева, все больше предприятий задумываются о замене физических предложений на цифровые инициативы [18].

Л.А. Гамидуллаева, М.П. Киреев констатировали, что большинство промышленных предприятий пока еще используют цифровые технологии либо для оптимизации операционных затрат и роста прибыли и рентабельности производства, либо для улучшения управления и роста производительности труда. При этом отсутствует комплексный подход к цифровой трансформации бизнес-модели предприятия [3]. По мнению авторов, основными причинами проблем являются отсутствие цифровой корпоративной культуры, стиль руководства, не нацеленный на четкое определение будущих выгод и контроль их достижения, и слабое экономическое обоснование изменений. Проблемы конфиденциальности информации и безопасности в таком случае отходят на второй план.

Кроме того, О.И. Житяева отмечает, что внедрение блокчейн требует отказа от многоуровневых иерархических систем управления, постоянного реинжиниринга бизнес-процессов, настраивания сквозных цифровых процессов [4]. Также серьезным препятствием для массового внедрения блокчейн-технологий в логистике являются высокие начальные затраты, связанные с разработкой и интеграцией программно-аппаратных решений, обучением персонала [19, с. 47]. Одним из способов решения данной проблемы может быть применение сторонней цифровой платформы, а не создание собственной цифровой платформы [20].

Специфика оборонного сектора и ракетно-космической отрасли формирует свои проблемы в ходе внедрения искомым технологий: слишком высокая стоимость «создания и эксплуатации, отсутствие общего стандарта для разработки платформ, отсутствие законодательства, регулирующего правовые аспекты их использования» [7]. По мнению Р.М. Полуэктова, Д.Ю. Иванова, на предприятиях ракетно-космической и авиационной отраслей должны быть созданы только собственные цифровые платформы. Авторы предложили примерную схему ее создания с помощью децентрализованных инвестиционных фондов [21].

Заключение

Отрасль промышленности всегда была восприимчивой к появлению новых технологий. Если внедрять технологии блокчейн целенаправленно, то они станут ключевым звеном развития производства. основополагающими направлениями совершенствования внедрения технологий блокчейна являются следующие направления:

- продвижение научных исследований и разработки блокчейна (здесь важны расширение функционала блокчейн-платформ за счет интеграции с другими сквозными технологиями и создание кросс-отраслевых блокчейн систем, состоящих из участников других секторов экономики);
- проведение глубокого обучения участников информационных обменов;
- совершенствование законодательства по использованию блокчейна (здесь актуальны будут отраслевые стандарты, протоколы обмена данными, модульные пакеты документов, дающие бесшовную интеграцию разных цифровых систем).

Внедрение технологий зависит от масштаба, типа производства, уровня технологичности. Внедрять технологии блокчейн следует избирательно, начиная с тех отраслей, где множественность источников поставок, тесные производственные связи, высокий организационно-технологический уровень, уровень затрат, подготовленные кадры, есть возможность адаптации технологий в гражданском секторе экономики. Оборонный сектор промышленности является высокопроизводительным и затратоемким, поэтому внедрение в нем технологий блокчейна в первую очередь целесообразно, так как это даст первоначально необходимый высокий экономический эффект.

В целях дальнейшего снижения цифрового неравенства между отраслями и регионами, а также для устойчивого распространения технологий государству следует сосредоточить усилия на создании исследовательских центров и лабораторий, где будут проводиться фундаментальные и прикладные исследования в сфере

компьютерных наук и цифровых бизнес-моделей, адаптировать международный опыт и стимулировать развитие цифровых бизнес-моделей.

В условиях роста требований к прозрачности, безопасности и адаптивности производственных процессов блокчейн способен обеспечить достоверность данных, снизить управленческие риски, повысить производительность и укрепить технологическую независимость национальной промышленности.

Список литературы

1. *Mougayar W.* The business blockchain: Promise, practice, and the application of the next internet technology. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016. 208 p. ISBN 978-1-119-30031-1
2. *Идрисов А.Э.* Эволюция моделей и инструментов цифровой трансформации в промышленности // Управление устойчивым развитием. 2022. № 6. С. 17–24. https://doi.org/10.55421/2499992X_2022_6_17 EDN: VRLVAZ
3. *Гамидуллаева Л.А., Киреев М.П.* Цифровая трансформация российских промышленных предприятий: проблемы и перспективы // Современные инструменты, методы и технологии управления знаниями. 2018. № 1. С. 1–7. EDN: LMEQUX
4. *Житяева О.И.* Управление цифровой трансформацией промышленного сектора // Вестник Самарского университета // Экономика и управление. 2021. Т. 12. № 2. С. 43–50. <https://doi.org/10.18287/2542-0461-2021-12-2-43-50> EDN: ZNQSLE
5. *Алексина А.С., Юсупов Р.Р., Борзунов И.В.* Анализ влияния технологии блокчейн в деятельности промышленных предприятий // Вестник Академии знаний. 2023. № 4. С. 22–26. EDN: TJYRTF
6. *Бочкарев А.М.* Повышение эффективности системы информационного обеспечения промышленного предприятия путем использования технологии блокчейн // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. 2019. № 3. С. 64–69. <https://doi.org/10.17122/2541-8904-2019-3-29-64-69> EDN: LKLMXK
7. *Ермолдина Г., Аден А., Бабышев А., Меллатова Е., Дуйсебаева А.* Применение блокчейн-технологии в оборонной и космических структурах // Вестник КазАТК. 2022. № 2. С. 656–666. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2022-121-2-656-666> EDN: UQXOVS
8. *Орлова Т.С., Тимошин А.А., Логинова С.А.* Подходы к решению проблем устойчивого развития для повышения конкурентоспособности промышленных предприятий в условиях цифровизации // Естественно-гуманитарные исследования. 2023. № 2. С. 164–168. EDN: TFHDNK
9. *Балиев И.В., Потапов А.А., Авторханов И.Р.* Управление цепями поставок и блокчейн-технологии // Экономика и управление: проблемы, решения. 2023. Т. 3. № 11. С. 112–118. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2023.11.03.013> EDN: DIPTUG
10. *Полуэктов Р.М.* О перспективах применения блокчейн-технологии в ракетно-космической отрасли // Экономика космоса. 2023. Т. 2. № 3. С. 58–69. https://doi.org/10.48612/agat/space_economics/2023.02.05.06 EDN: QSLDUY
11. *Treiblmaier H.* The impact of the blockchain on the supply chain: A theory-based research framework and a call for action // Supply Chain Management. 2018. Vol. 23. No. 6. P. 545–559. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3224145> EDN: SLZDLO
12. *Ильинская Е.М., Титова М.Н., Ильинский В.В.* Инновации бизнес-моделей в цифровой экономике // Цифровая экономика и сквозные технологии: теория и практика / под ред. А. В. Бабкина. СПб : СПбПУ Петра Великого, 2019. С. 113–145. EDN: BKRIHC
13. *Симченко Н.А., Тимиргалева Р.Р., Цёхла С.Ю., Гришин И.Ю., Шпырко О.А., Гербер Ю.Б., Макареня Т.А., Фурсов В.А., Лазарева Н.В., Казанская А.Ю., Куц Е.Н., Налесная Я.А., Хуссейн Ахмед Ф.А.* Устойчивое развитие промышленности в условиях цифровой поляризации. Севастополь : Филиал МГУ в г. Севастополе, 2022. 242 с. ISBN 978-5-907330-91-7 EDN: HJDRTF
14. *Полуэктов Р.М.* Блокчейн-технология как инструмент оптимизации работы предприятий ракетно-космической и авиационной промышленности // Аэро-космическая техника и технологии. 2024. Т. 2. № 2. С. 61–77. <https://doi.org/10.52467/2949-401X-2024-2-2-61-77> EDN: FBTKNU
15. *Шкодинский С. В., Степанов Д.А.* Цифровизация деятельности промышленных предприятий как стратегический фактор их устойчивого развития // Проблемы рыночной экономики. 2021. № 4. С. 40–49. <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2021-4-40-49> EDN: AQLLUS
16. *Нестеров Я.А., Семенов Н.А.* Применение технологии блокчейн в промышленности как части Индустрии 4.0 // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. № 2. С. 93–98. <http://doi.org/10.46573/2658-5030-2021-93-98>
17. *Седунов Р.А.* Перспективы использования технологии блокчейн в оборонной сфере на примере «смарт-контрактов» // Военное право. 2023. № 4. С. 112–116. EDN: MXDRCI
18. *Васильева Л.П., Полянская О.А.* Цифровой маркетинг как инструмент обеспечения экономической безопасности предприятий в условиях кризиса // Управленческий учет. 2022. № 10–2. С. 257–263. <https://doi.org/10.25806/uu10-22022257-263> EDN: YAQBLS

19. Крючков И.С. Блокчейн-технологии в логистике хлебопекарной промышленности: перспективы применения и ограничения // *Хлебопечение России*. 2024. Т. 68. № 4. С. 45–54. EDN: SEEIRR

20. Платонов В.В., Спиридонов Г.И. Проблемы и перспективы использования блокчейн-технологий в деятельности предприятий // *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2021. № 3. С. 102–109. EDN LOHVGG

21. Полужетов Р.М., Иванов Д.Ю. Концепция децентрализованного инвестиционного фонда в ракетно-космической отрасли на базе блокчейн-технологии // *Экономика космоса*. 2024. Т. 3. № 3. С. 19–28. http://doi.org/10.48612/agt/space_economics/2024.03.09.03 EDN: OKMLWE

References

1. Mougayar W. *The business blockchain: Promise, practice, and the application of the next -internet technology*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2016. ISBN 978-1-119-30031-1

2. Idrisov AE. Evolution of models and tools of digital transformation in the industry. *Managing Sustainable Development*. 2022;6:17–24. (In Russ.) https://doi.org/10.55421/2499992X_2022_6_17 EDN: VRLVAZ

3. Gamidullayeva LA, Kireev MP. Digital transformation of Russian industrial enterprises: problems and future prospects. *Modern Knowledge Management Tools, Techniques and Technologies*. 2018;1(1):1–7. (In Russ.) EDN: LMEQUX

4. Zhityaeva OI. Managing the digital transformation of the industrial sector. *Vestnik of Samara University. Economics and Management*. 2021;12(2):43–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2542-0461-2021-12-2-43-50> EDN: ZNQSLD

5. Aleksina AS, Yusupov RR, Borzunov IV. Analysis of the impact of blockchain technology on the sustainable development and competitiveness of high-tech industrial enterprises. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2023; 4:22–26. (In Russ.) EDN: TJYRTF

6. Bochkarev AM. Improving the efficiency of the information support system of industrial enterprises through the use of blockchain technology. *Bulletin USPTU. Science, Education, Economy. Series Economy*. 2019;3:64–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/2541-8904-2019-3-29-64-69> EDN: LKLMXK

7. Yermoldina G, Bapyshev A, Mellatova YE, Aden A, Duisebayeva A. The use of blockchain technology in the defense industry and space structures. *Bulletin of KazATC*. 2022;2:656–666. (In Russ.) <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2022-121-2-656-666> EDN: UQXOVS

8. Orlova TS, Timoshin AA, Loginova SA. Approaches to solving the problems of sustainable development to increase the competitiveness of industrial enterprises.

Studies in Natural Sciences and Humanities. 2023;2:164–168. (In Russ.) EDN: TFHDNK

9. Baliev IV, Potapov AA, Avtorkhanov IR. Supply chain management and blockchain technology. *Economics and Management: Problems, Solutions*. 2023;3(11):112–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2023.11.03.013> EDN: DIPTUG

10. Poluektov RM. About prospects of using blockchain technology in the rocket and space industry. *Space Economics*. 2023;3:58–69. (In Russ.) https://doi.org/10.48612/agt/space_economics/2023.02.05.06 EDN: QSLDUY

11. Treiblmaier H. The impact of the blockchain on the supply chain: A theory-based research framework and a call for action. *Supply Chain Management*. 2018;23(6): 545–559. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3224145> EDN: SLZDLO

12. Ilinskaya EM, Titova MN, Ilinskyi VV. Business model innovation in the digital economy. In: Babkin AV, editor. *Digital Economy and End-to-End Technologies: Theory and Practice*. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2019. p. 113–145. (In Russ.) EDN: BKRIHC

13. Simchenko NA, Timirgaleeva RR, Tsekha SYu, Grishin IYu, Shpyrko OA, Gerber YuB, Makarenaya TA, Fursov VA, Lazareva NV, Kazanskaya AYu, Kushch EN, Nalesnaya YaA, Hussein Ahmed FA. *Sustainable industrial development amid digital polarization*. Sevastopol: Branch of Moscow State University in Sevastopol; 2022. (In Russ.) ISBN 978-5-907330-91-7 EDN: HJDRTF

14. Poluektov RM. Blockchain technology as a tool to optimize the operation of the space and aviation industry enterprises. *Aerospace Engineering and Technology*. 2024; 2(2):61–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.52467/2949-401X-2024-2-2-61-77> EDN: FBTKNU

15. Shkodinsky SV, Stepanov DA. Digitalization of industrial enterprises as a strategic factor in their sustainable development. *Market Economy Problems*. 2021;4:40–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2021-4-40-49> EDN: AQLLUS

16. Nesterov YA, Semenov NA. Application of blockchain technology in industry as part of Industry 4.0. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Technical Science»*. 2021;2:93–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2021-93-98> EDN: QJGBBC

17. Sedunov RA. Prospects of blockchain technology usage in defense sphere by example of “Smart-agreements”. *Military Law*. 2023;4:112–116. (In Russ.) EDN: MXDRCI

18. Vasil'eva LP, Polyanskaya OA. Digital marketing as a tool to ensure the economic security of enterprises in a crisis. *Management Accounting*. 2022;10-2:257–263. (In Russ.) <https://doi.org/10.25806/uu10-22022257-263> EDN: YAQBLS

19. Kryuchkov IS. Blockchain technologies in the logistics of the bakery industry: Application prospects and limitations. *Bakery of Russia*. 2024;68(4):45–54. (In Russ.) EDN: SEEIRR

20. Platonov VV, Spiridonov GI. Challenges of the blockchain technologies implementation in the activities of enterprises. *Izvestia of St. Petersburg State University of Economics*. 2021;3:102–109. (In Russ.) EDN: LOHVGG

21. Poluektov R, Ivanov D. Concept of a decentralized investment fund in the rocket and space industry based on blockchain technology. *Space Economics*. 2024;3:19–28. (In Russ.) https://doi.org/10.48612/agat/space_economics/2024.03.09.03 EDN: OKMLWE

Сведения об авторах

Маликов Евгений Александрович, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0004-8656-9341; e-mail: dizel62rus@yandex.ru

Талла Фонганг Тьерри Патрик, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0009-6579-8205; e-mail: thierrytalla@gmail.com

Пьянков Валерий Валерьевич, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0003-5760-6732; e-mail: valeriy.pyankov@gmail.com

About the authors

Evgeny A. Malikov, Postgraduate student of the Department of Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-8656-9341; e-mail: dizel62rus@yandex.ru

Thierry Patrick Talla Fongang, Postgraduate student of the Department of Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-6579-8205; e-mail: thierrytalla@gmail.com

Valeriy V. Pyankov, Postgraduate student of the Department of Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-5760-6732; e-mail: valeriy.pyankov@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-61-69

EDN: HCNJWT

Research article / Научная статья

Improving the Efficiency of Distance Learning with a Minimum Network Load

Reda Sameer Al Hakim^a, Ekaterina A. Kovaleva^a,
Larisa O. Andreeva^a, Tatiana V. Bogacheva^b

^aRUDN University, Moscow, Russian Federation

^bRussian state University of tourism and service, Moscow, Russian Federation

al-khakim-r@rudn.ru

Article history

Received: September 29, 2025

Revised: November 12, 2025

Accepted: November 25, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The rapid onset of the COVID-19 crisis compelled immediate responses to mitigate infection risks, particularly in education. A swift transition to e-learning became a necessity, posing myriad challenges for students and institutions. Issues ranged from technical considerations to educators' preparedness and students' readiness, necessitating a reevaluation of the role of information technology in education. The didactic potential of e-learning tools is considered, and methodological recommendations are formulated for their integration into pedagogical practice, adaptation to both distance and traditional conditions. An analysis of relevant international studies informs the development of a teaching method that optimizes distance-learning efficiency and minimizes network load. This method strategically balances synchronous and asynchronous learning, considering network traffic reduction, fostering equal educational opportunities regardless of location, health, or financial status. This study affirms the method's effectiveness through a comparative analysis of the results with those of previous traditional semesters. This research contributes valuable insights for navigating the challenges posed by the pandemic in the education sector. This study aims to explore the pedagogical possibilities of e-learning tools and offer methodological recommendations for their incorporation into teaching practices, adaptable to both remote and conventional environments. Additionally, it seeks to develop and validate a teaching approach that enhances the efficiency of distance learning, reduces network load, and promotes equitable educational access, addressing the challenges associated with the rapid development and widespread adoption of e-learning technologies.

Keywords: e-learning, learning management, network bandwidth, Quality of Service (QoS), educational technologies, digital accessibility

Authors' contribution

Al Hakim R.S. — development of the research methodology, data analysis, writing; *Kovaleva E.A.* — literature review, analytical support, methodological recommendations; *Andreeva L.O.* — research supervision, formulation of the research concept; *Bogacheva T.V.* — literature review. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Al Hakim RS, Kovaleva EA, Andreeva LO, Bogacheva TV. Improving the efficiency of distance learning with a minimum network load. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):61–69. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-61-69>
EDN: HCNJWT

© Al Hakim R.S., Kovaleva E.A., Andreeva L.O., Bogacheva T.V., 2026




This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Повышение эффективности дистанционного обучения при минимальной нагрузке на сеть

Р.С. Аль Хаким^a, Е.А. Ковалева^a, Л.О. Андреева^a, Т.В. Богачева^b

^a Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^b Российский государственный университет туризма и сервиса, Москва, Российская Федерация

 al-khakim-r@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 29 сентября 2025 г.

Доработана: 12 ноября 2025 г.

Принята к публикации: 25 ноября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Пандемия COVID-19 обусловила необходимость экстренного перехода образовательных учреждений к дистанционному формату обучения, что выявило ряд организационных, методических и технических проблем. Особое значение приобрели вопросы эффективности дистанционного обучения и обеспечения равного доступа к образовательным ресурсам при ограниченных возможностях сетевой инфраструктуры. Рассмотрены педагогические возможности электронных образовательных технологий и предложены методические рекомендации по их интеграции в учебный процесс в условиях дистанционного и смешанного обучения. На основе анализа зарубежного и отечественного опыта разработан авторский метод организации дистанционного обучения, основанный на рациональном сочетании синхронных и асинхронных форм взаимодействия, позволяющий повысить эффективность обучения при минимальной нагрузке на сеть. Эффективность предложенного метода подтверждена результатами педагогического эксперимента и сравнительного статистического анализа учебных достижений студентов в дистанционном и традиционном форматах обучения. Полученные результаты демонстрируют сопоставимый уровень учебных достижений и высокую степень удовлетворенности обучающихся, что свидетельствует о практической значимости предложенного подхода и возможности его применения в условиях ограниченных сетевых ресурсов.

Ключевые слова: электронное обучение, управление обучением, пропускная способность сети, качество обслуживания (QoS), образовательные технологии, цифровая доступность

Вклад авторов

Аль Хаким Р.С. — разработка математической модели, пусконаладочные работы, написание текста; Ковалева Е.А. — анализ научной литературы, рекомендации; Андреева Л.О. — научное руководство, концепция исследования; Богачева Т.В. — обзор научной литературы. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Al Hakim R.S., Kovaleva E.A., Andreeva L.O., Bogacheva T.V. Improving the efficiency of distance learning with minimum network load // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 61–69. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-61-69> EDN: HCNJWT

Introduction

The concept of “distance learning” was introduced for the first time in Europe in the XIX century. Students received educational materials by mail, corresponded with teachers, sent their written works to the teacher for verification and received comments from them by mail. The founder of distance learning is the British shorthand scholar

Isaac Pitman, who in the 1840s introduced an innovative system of learning using shorthand. As an English teacher, in 1837, he suggested introducing shorthand writing into teaching, which would allow better interaction with students [1].

Other educational institutions began to adopt this learning experience. Colleges began to create that mail-provided education in accordance with the university program. In 1850, Gustav Langen-

scheidt published the so-called “teaching letters” in Germany, which allowed everyone to learn the language [2].

In America, the first steps were also taken in the development of distance learning. In 1873, Anna Eliot Ticknor began developing a system of education for women that was conducted by mail. It was based on the English program “Home Education Support Society” [3].

In 1911, distance learning courses began appearing in Australia. They were conducted at the university level at the University of Queensland. Mail-order training was also organized for children living far from school [4]. In a fairly short period of time, the distance learning system has spread to many countries. This included the possibility of training for schools and technical colleges. At this stage, the training was conducted in a handwritten version. Textbooks were published in paper form and delivered via mail. Publications at that time were not distinguished by high-quality printing and paper.

In the subsequent phase, the books exhibited enhanced quality, accompanied by the introduction of color illustrations. The materials were also supplemented with audio and video recordings. This stage dates back to 1969, when the Open University was established in the UK [5].

The third stage is associated with the active development of information technologies. This includes working with e-mail, the possibility of using teleconferences, and working with graphics and multimedia. In other words, at the present stage of development, communication between teachers and students is arranged as technologically and conveniently as possible.

In the 2000s, distance learning became the dominant form of learning. The Internet system was improving and becoming more accessible, and distance education technologies were developing. Consequently, the number of universities using Internet technologies has increased.

Today, distance learning has reached a new level of teacher-student interaction. The use of the Internet and personal computers allows for real-time communication, and modern software makes it possible to work effectively with a variety of

multimedia information in virtual space, regardless of the actual location of the teacher and the student. Simultaneously, the quality of distance education is constantly growing, including the reliability of procedures for monitoring learning outcomes and the objectivity of evaluating educational achievements [6].

The coronavirus pandemic has changed the usual way of life worldwide. Companies adapt to new conditions quickly: online stores and courier services have already introduced contactless delivery, and office workers have gone into quarantine and work from home. The rules have also changed for education, and the situation in the world has forced schools, technical colleges, and higher educational institutions to mandatory switch to distance learning.

The COVID-19 outbreak transformed distance learning from a desirable alternative into an immediate necessity, at least in the short term, with considerable uncertainty regarding the duration of this shift. This has brought distance learning to a much wider audience. Consequently, schools have had to create or fast-track online education plans to get teachers and students on board with the latest technology as quickly as possible [7].

On the other hand, this crisis stimulated innovation in the field of education. Innovative approaches have been applied on a large scale to ensure the continuity of education, and solutions for distance learning have been developed quite quickly, thanks in no small part to the measures taken by the governments of many countries.

The changes that have taken place regarding the accelerated transformation of the ways of providing quality education have made us think not only about the promising prospects of learning in the future, but also about the problems associated with this transformation. This is primarily about the problems of students who suffer from a lack of resources or a favorable environment for access to learning, as well as the problems of teachers who need to effectively master new teaching methods.

All these factors have led to extensive discussions among education professionals regarding the state and accessibility of distance education, the impact of COVID-19 on distance learning, and

the role of teachers and administrators in ensuring effective online instruction, as further discussed in the following section.

1. Materials and Methods

In particular, the goal of our study was to solve the following tasks:

- Determine the best way to minimize network load without affecting the quality of distance learning.
- Analyze and compare the differences in learning outcomes between learners studying using web-based and conventional modes.
- Collect feedback from students concerning our e-learning method.

To optimize the distance learning process, a method was developed based on two key principles: maximizing instructional efficiency and minimizing network load. Improving the effectiveness of distance learning requires the integration of appropriate instructional approaches and a balanced combination of synchronous and asynchronous learning formats, while taking network load constraints into account in order to ensure equal learning opportunities regardless of students' location, devices, or network conditions.

1.1. Asynchronous Learning

Asynchronous learning allows students to study according to their own schedule for a certain period of time. They can access lectures, read materials, and do homework and research at any time during one or two weeks.

Advantages of asynchronous learning:

- Flexibility of the schedule
- Individually dictated tempo
- More democratic
- More accessible
- More time with the materials

Within the proposed approach, asynchronous training was performed as follows:

- Watching various videos on different topics.
- Further research on these topics.
- Preparation of a presentation on these topics for the seminars.

1.2. Synchronous Learning

Synchronous learning, by definition, refers to an educational event in which a group of participants is engaged in learning at the same time; for this, they must be in the same physical place, for example, in a classroom, or in the same online environment (as in our case), where they can interact with the teacher and other participants.

Advantages of synchronous learning:

- Exchange of knowledge and experience among participants.
- Real-time feedback.
- Students become more engaged in their learning.
- Students feel a stronger sense of collaboration.

Within the proposed approach, asynchronous training was performed as follows:

- Questions, debates, and games.
- Video discussions in lectures.
- Presentations and reports at seminars.

Figure 1 shows the weekly learning process.

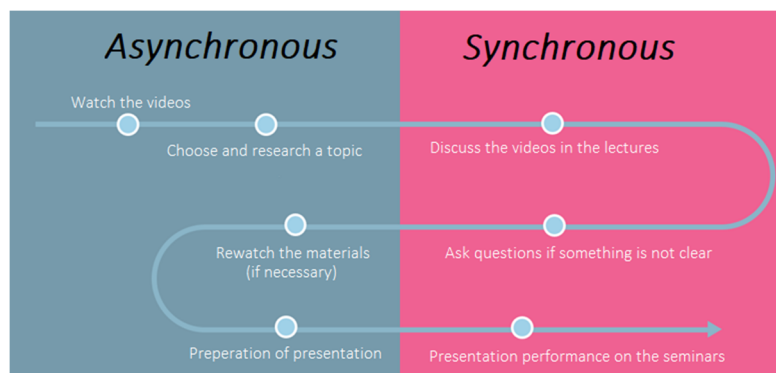


Figure 1. Weekly learning process

Source: by R.S. Al Hakim, E.A. Kovaleva, L.O. Andreeva.

As shown in Figure 1, the weekly cycle consists of seven steps. First, teachers send links to the required videos through WhatsApp 3–4 days before the lecture. Every student in turn chooses a topic and starts to study it, prepare it well, and write down his notes and questions about it. The third step is lectures, which are held synchronously on Microsoft Teams. The teacher asks questions about the given videos to determine the level of students’ understanding. The students also have the right to ask questions and receive real-time feedback from the teacher. After that, the students will have time to review their topics and prepare presentations on them. The last step is the delivery of presentations at the seminars, which also happens synchronously on Microsoft Teams and is evaluated by the teacher.

1.3. Network Requirements

Considering that more than 8000 foreign students from 155 countries study at our university, it is worth noting that not everyone has equal conditions due to the speed of the Internet and the presence of necessary materials. However, it is important for us that everyone has equal opportunities to act and gain knowledge. Therefore, it is very important to minimize the network load in our method so that everyone can acquire as much knowledge as possible, despite the different conditions for everyone. For this purpose, the minimum network requirements were analyzed and calculated for each stage of the proposed learning method (Figure 2). In addition, regular feedback from students was collected on a weekly basis to verify the stability and feasibility of the proposed approach under real learning conditions.

The highest Internet bandwidth requirement within the proposed approach is associated with video content consumption, which requires a minimum data rate of approximately 500 kbps. In contrast, activities such as web searching, reading academic materials, and collecting information for presentations can be performed with a substantially lower bandwidth of approximately 100 kbps.

Synchronous sessions were conducted using Microsoft Teams. During discussions and question-

and-answer segments, peer-to-peer audio communication is employed, requiring a minimum bandwidth of approximately 30 kbps. Presentation activities involve screen sharing and therefore require a higher bandwidth, estimated at approximately 130 kbps.

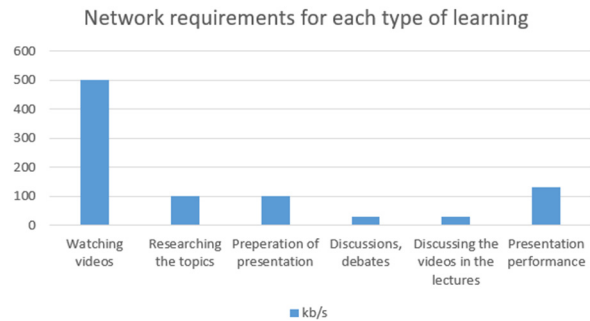


Figure 2. Network presentation delivery for each type of learning

Source: by R.S. Al Hakim, E.A. Kovaleva, L.O. Andreeva, based on Microsoft Teams technical documentation.

Overall, the analysis demonstrates that an Internet speed of 500 kbps is sufficient to support all components of the proposed distance-learning method, indicating its feasibility under limited network conditions.

2. Results

This section presents the characteristics of the three student groups, followed by an analysis of their academic performance with attention to identified differences. In addition, students’ perceptions of their learning experiences were examined.

As distance learning becomes an increasingly integral component of educational practice, understanding its technical characteristics and the requirements of different learning formats is essential for further improvement of the learning process.

2.1. Sample Characteristics

The data for the study were obtained from three groups of second-term full-time civil engineering learners through the subject “Basics of Engineering Economics and Management.” The first, second, and third groups consisted of 23, 22, and 19 students, respectively. The method was applied to the first

module of 2021–2022 semester (9 weeks). Table 1 shows the distribution of marks through the 9-week study plan of the module.

Unfortunately, not all the students could attend the module, due to the pandemic situation, some students took a gap year, or just stopped learning for personal reasons, 2 students didn't attend from the second group, and 3 from the third, they have been excluded from our statistics in order to get more accurate results, more details about the results of groups are shown at Table 2.

Table 1. *Distribution of marks*

Activity's type	Marks	Period	Maximum marks
Lectures	4	*8 weeks	80
Seminars	6		
Exam/paper/conference	20	Last week	20
–	–	In total	100

Source: by R.S. Al Hakim, E.A. Kovaleva, L.O. Andreeva.

Table 2. *Statistics of groups' results*

Group	Number of students	Average mark	Max	Min	Standard deviation
1	23	85.9	98	51	8.01
2	20	76.1	96	51	18
3	16	83.6	98	51	13.9

Source: by R.S. Al Hakim, E.A. Kovaleva, L.O. Andreeva.

Learners were assessed based on eight presentations, interaction with the teachers, and answering comprehensive questions, and the final activity, which could be presented as an exam, paper publication, or participation in conferences of their own choice.

2.2. Learning Outcomes

An important goal of e-learning is that it should not be less effective than conventional face-to-face learning in classrooms. According to [8], learning results can be evaluated at four levels:

Level 1. Reaction: This measures the students' reactions to the course.

Level 2. Learning: This measures what the students have learned.

Level 3. Transfer: This measures the changes in the learners' behavior when they return to their jobs after their training programs.

Level 4. Results: This measures the business outcomes that occur because the learners are doing their jobs differently.

In this study, we applied the first two levels of Kirkpatrick's learning evaluation as long as they are applicable in our case, Levels 3 and 4 require a more complicated and expensive study to collect the relevant data. There are many relevant variables and several complicating factors (such as motivation, trainability, job attitude, and personal characteristics) that make it difficult to evaluate the direct impact of learning on job performance and business outcomes [9].

Level 1 measures how the learners feel about their learning experience. It does not measure learning directly but simply measures the level of learners' satisfaction with their own learning experience. This measurement can be conducted using a reaction survey administered to learners. Here are some examples of survey questions to be asked: Are you satisfied with this course? Do you consider the material pertinent? Would you recommend this course to your friends or colleagues? Do you think the material is helpful for learners?

Level 2 consists of two main points: first, it requires a method to measure learning, which is commonly done by using an outcome assessment in the form of test scores. In the present study, an investigation was conducted into the outcomes of a specific e-learning module, comparing them with those previously obtained from a face-to-face module of the same groups. The comparison revealed a high degree of similarity between the results, indicating that e-learning implemented through the proposed method is not inferior to conventional instructional approaches. The detailed results of the comparative analysis are presented in Table 3.

As demonstrated in Table 3, no substantial disparities were identified. Furthermore, a t-test was conducted to ensure that no significant difference was detected in students' results between distance and conventional learning. P-values were calculated from the deviation between the observed value and

a chosen reference value, given the probability distribution of the statistic, with a greater difference between the two values corresponding to a lower P-value. In statistics, a P-value less than 0.05 is typically considered to be statistically significant, while P-value greater than 0.05 means that no effect was observed. The results are presented in Table 4.

Table 3. *Comparing results with previous conventional semester*

Group	Average mark		Max		Min		Standard deviation	
	Dist.	Trad.	Dist.	Trad.	Dist.	Trad.	Dist.	Trad.
1	85.9	86.3	98	98	51	51	8.01	6.74
2	76.1	76.6	96	95	51	51	18	17.5
3	83.6	83.3	98	98	51	51	13.9	13.3

Source: by R.S. Al Hakim, E.A. Kovaleva, L.O. Andreeva.

Table 4. *Test Results*

Group	P-value	Reject null hypothesis
1	0.23	Fail
2	0.35	Fail
3	0.30	Fail

Source: by R.S. Al Hakim, E.A. Kovaleva, L.O. Andreeva.

As demonstrated by the results analysis, no statistically significant discrepancy was identified between the outcomes of students in both traditional and distance education settings when our methodology was employed.

The second important point to evaluate in learning is the students’ comments and feedback. At the conclusion of each course, the learners were requested to evaluate the teachers and the method used, providing suggestions to improve their learning experience. Overall, 90% of the students were satisfied with their learning experience and agreed that they had learned the subject matter. They provided the following suggestions:

- Enhance animation and multimedia content.
- Videos should be shortened due to time limitations.
- Provide more topics related to their major.

The teachers, in turn, noticed that by the end of the course, the students became more confident

in presentations than they were in the very first weeks, which means that they acquired good communication skills through the course. The subjective views of the lecturers based on the depth of the questions and the comments of the students reflected the good level of knowledge gained by them.

3. Discussion

Previous studies have extensively examined the challenges and limitations of distance learning during the COVID-19 pandemic. A significant number of studies have focused on identifying the advantages, constraints, and general recommendations for online education in different national contexts [10–14], while other studies have relied primarily on surveys of students’ and teachers’ perceptions to assess the effectiveness of emergency remote teaching [15–18]. In addition, several researchers have investigated barriers to online learning, classifying them into technical, organizational, individual, and socio-economic categories [19; 20].

Despite differences in methodology and geographical focus, a common conclusion can be observed across these studies: technical constraints, particularly limited Internet bandwidth and unequal network conditions, represent a major challenge for effective distance learning. These constraints are strongly influenced by factors such as country of residence, type of Internet connection, available devices, and students’ economic conditions. However, in most existing studies, technical limitations are described as external factors rather than addressed through concrete, system-level solutions.

In contrast to prior research, this study addresses this gap by proposing a distance learning method that explicitly accounts for network Quality of Service (QoS) requirements. The proposed approach integrates synchronous and asynchronous learning formats while minimizing data transmission demands, thereby enabling effective instruction under heterogeneous and limited-network conditions. By aligning instructional design with network constraints, this method aims to improve learning efficiency while ensuring equitable access to education, regardless of students’ technical capabilities.

Conclusion

The rapid transition to distance learning during the COVID-19 pandemic highlighted the critical role of technical factors in ensuring the quality and accessibility of education. In this study, a distance learning approach was developed that integrated synchronous and asynchronous learning formats while explicitly accounting for network Quality of Service constraints.

The obtained results demonstrate that a balanced organization of learning activities makes it possible to reduce network load without compromising educational effectiveness. The experimental implementation of the proposed approach in real educational settings showed learning outcomes comparable to those of traditional face-to-face instruction, which was confirmed by statistical analysis.

Overall, the findings indicate that effective distance learning can be achieved under heterogeneous and limited network conditions when instructional design and network requirements are jointly considered. This confirms the practical applicability of the proposed approach in educational environments with constrained or unstable Internet connectivity and provides a basis for further research on its long-term effectiveness and scalability.

References

1. Banas EJ, Emory WF. History and issues of distance learning. *Public Administration Quarterly*. 1998; 22(3):365–383. Available from: <http://www.jstor.org/stable/40862326> (accessed: 12.05.2025).
2. Rushby N, Surry D. *The wiley handbook of learning technology*. John Wiley & Sons Publ.; 2016. ISBN 978-1-118-73643-2
3. Bergmann HF. “The silent university”: The society to encourage studies at home, 1873–1897. *The New England Quarterly*. 2001;74(3):447–477. <https://doi.org/10.2307/3185427>
4. Middlehurst R, Woodfield S. Quality review in distance learning: Policy and practice in five countries. *Tertiary Education and Management*. 2006;12(1):37–58. <https://doi.org/10.1007/s11233-005-4072-5>
5. Northcott P. The Institute of educational technology, the open university: Structure and operations, 1969–1975. *Programmed Learning and Educational Technology*. 1976;13(4):11–24. <https://doi.org/10.1080/1355800760130403>
6. Popescu AIC. E-learning in the post-pandemic future. *Conference proceedings of “eLearning and Software for Education” (eLSE)*. 2021 Apr. Carol I National Defence University Publ.; 2021;17(01):42–46. <https://doi.org/10.12753/2066-026X-21-005>
7. Hakeem RAL. Quality of service management for effective distance learning. *17th International Scientific Conference on Elearning and Software for Education, ELSE 2021*. 2021 Apr 22–23; Bucharest: Carol I National Defence University Publ.; 2021. p. 336–344. EDN: VYMZLQ
8. Kirkpatrick DL, Kirkpatrick J. *Evaluating training programs: The four levels*. Berrett-Koehler Publ.; 2006. ISBN 157675796X / 9781576757963
9. Leung HK. Evaluating the effectiveness of e-learning. *Computer Science Education*. 2003;13(2):123–136. <https://doi.org/10.1076/csed.13.2.123.14201>
10. Dhawan S. Online learning: A panacea in the time of COVID-19 crisis. *Journal of educational technology systems*. 2020;49(1):5–22. <https://doi.org/10.1177/0047239520934018> EDN: TFBIUI
11. Mukhtar K, Javed K, Arooj M, Sethi A. Advantages, Limitations and Recommendations for online learning during COVID-19 pandemic era. *Pakistan Journal of Medical Sciences*. 2020;36(COVID19-S4):S27. <https://doi.org/10.12669/pjms.36.COVID19-S4.2785>
12. Hussein E, Daoud S, Alrabaiah H, Badawi R. Exploring undergraduate students’ attitudes towards emergency online learning during COVID-19: A case from the UAE. *Children and youth services review*. 2020;119: 105699. <https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2020.105699> EDN: EKLALA
13. Beltekin E, Kuyulu İ. The Effect of coronavirus (COVID19) outbreak on education systems: evaluation of distance learning system in Turkey. *Journal of Education and Learning*. 2020;9(4):1. <https://doi.org/10.5539/jel.v9n4p1> EDN: PNLWNU
14. Coman C, Țîru LG, Meseșan-Schmitz L, Stanciu C, Bularca MC. Online teaching and learning in higher education during the coronavirus pandemic: Students’ perspective. *Sustainability*. 2020;12(24):10367. <https://doi.org/10.3390/su122410367> EDN: MDLPDJ
15. Azhari B, Fajri I. Distance learning during the COVID-19 pandemic: School closure in Indonesia. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*. 2022;53(7):1934–1954. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2021.1875072>
16. Barabash O, Musienko A, Hohoniants S, Lap-tiev O, Salash O, Rudenko Y, Klochko A. Comprehensive methods of evaluation of efficiency of distance learning system functioning. *International Journal of Computer Network and Information Security*. 2021;13(1):16–28. <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2021.01.02> EDN: HPOOFK
17. Kharadze N, Giorgobiani M, Melkoshvili T, Dzebisauri L, Pirtskhalaishvili D. Effective strategies to

manage the teacher intellectual work productivity in distance learning. *Journal of Eastern European and Central Asian Research*. 2021;8(4):653–665. <https://doi.org/10.15549/jeeacar.v8i4.840> EDN: UXOHDA

18. Muthuprasad T, Aiswarya S, Aditya KS, Jha GK. Students' perception and preference for online education in India during COVID-19 pandemic. *Social Sciences & Humanities Open*. 2021;3(1):100101. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2020.100101> EDN: KNOAKU

19. Baticulon RE, Sy JJ, Alberto NRI, Baron MBC, Mabulay REC, Rizada LGT, Tiu CJS, Barriers to online learning in the time of COVID-19: A national survey of medical students in the Philippines. *Medical science educator*. 2021;31(2):615–626. <https://doi.org/10.1007/s40670-021-01231-z> EDN: JMOBMY

20. Abuhammad S. Barriers to distance learning during the COVID-19 outbreak: A qualitative review from parents' perspective. *Heliyon*. 2020;6(11):e05482. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05482>

About the authors

Reda Sameer Al Hakim, Assistant Lecturer of the Department of Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3385-6210, ORCID: 0000-0002-8481-4030; e-mail: al-khakim-r@rudn.ru

Ekaterina A. Kovaleva, PhD in Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1654-4395, ORCID: 0000-0002-4937-528X; e-mail: kovaleva-ea@rudn.ru

Larisa O. Andreeva, PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Innovation Management in Industrial Sectors, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2258-3926, ORCID: 0000-0002-3587-7350; e-mail: andreeva-lo@rudn.ru

Tatiana V. Bogacheva, PhD in Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Management, Russian State University of Tourism and Service, 99 Main St, Pushkinsky city district, Moscow region, 141221, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9785-1263, ORCID: 0009-0007-0740-7566; e-mail: tvbogacheva@mail.ru

Сведения об авторах

Аль Хаким Руда Самир, ассистент кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 3385-6210, ORCID: 0000-0002-8481-4030; e-mail: al-khakim-r@rudn.ru

Ковалева Екатерина Александровна, кандидат экономических наук, доцент кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 1654-4395, ORCID: 0000-0002-4937-528X; e-mail: kovaleva-ea@rudn.ru

Андреева Лариса Олеговна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 2258-3926, ORCID: 0000-0002-3587-7350; e-mail: andreeva-lo@rudn.ru

Богачева Татьяна Вячеславовна, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и управления, Российский государственный университет туризма и сервиса, Российская Федерация, 141221, Московская обл., Городской округ Пушкинский, пгт. Черкизово, ул. Главная, д. 99; eLIBRARY SPIN-код: 9785-1263, ORCID: 0009-0007-0740-7566; e-mail: tvbogacheva@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-70-80
EDN: HMGJLL

Research article / Научная статья

Factors Influencing the Formation of Augmented Reality Systems

Larisa V. Kruglova^{ID}✉, Fafa K. Ceesay^{ID}, Rokhaya Samb^{ID}

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ kruglova-lv@rudn.ru

Article history

Received: August 5, 2025
Revised: October 22, 2025
Accepted: November 5, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. This study identifies and analyzes the factors influencing the formation, functioning, usability, and efficiency of augmented reality (AR) systems. The first group of factors is determined by the technical characteristics of the system and the information infrastructure. The quality of the sensors determines the degree of detail and reliability of the initial data; devices with low accuracy can cause delays, drift, or jitter, which negatively affect the stability of the virtual object. Accurate positioning and tracking depend on GPS signals, visual-inertial odometry, or marker-based systems that can be affected by multichannel interference, signal jamming, or sensor noise, resulting in a mismatch between the physical and virtual worlds. Network bandwidth limitations affect real-time data streaming, cloud rendering, and multi-user synchronization, and unreliable connections result in skips or delays. The second group of factors refers to environmental conditions. Fluctuations in lighting can cause noise, decrease contrast, and disrupt object detection algorithms, which require the use of reliable computer vision techniques. This study proposes a solution to problems that improves the quality of augmented reality content and is key to the creation and development of AR systems.

Keywords: hardware and software, sensor fusion, environmental conditions, computer vision, real-time data

Authors' contribution

Kruglova L.V. — planning and overall supervision, validation; *Ceesay F.K.* — writing, visualization; *Samb R.* — conducting research. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Kruglova LV, Ceesay FK, Samb R. Factors influencing the formation of augmented reality systems. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):70–80. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-70-80> EDN: HMGJLL

Факторы, влияющие на формирование систем дополненной реальности

Л.В. Круглова^{ID}✉, Ф.К. Сисей^{ID}, Р. Самб^{ID}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ kruglova-lv@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 5 августа 2025 г.
Доработана: 22 октября 2025 г.
Принята к публикации: 5 ноября 2025

Аннотация. Определены и проанализированы факторы, влияющие на формирование, функционирование, удобство использования и эффективность систем дополненной реальности (ДР). Первая группа факторов обусловлена техническими характеристиками системы и информационной инфра-

© Kruglova L.V., Ceesay F.K., Samb R., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

структуры. Качество сенсоров определяет степень детализации и надежность исходных данных; устройства с низкой точностью могут вызывать задержку, дрейф или дрожание, что отрицательно влияет на стабильность виртуального объекта. Точное позиционирование и отслеживание зависят от сигналов GPS, визуально-инерциальной одометрии или систем на основе маркеров, которые могут подвергаться помехам от многоканальности, перекрытий сигналов или шума датчиков, что приводит к несоответствию между физическим и виртуальным мирами. Ограничения пропускной способности сети влияют на потоковую передачу данных в реальном времени, облачный рендеринг и многопользовательскую синхронизацию, а ненадежные соединения приводят к пропуску кадров или задержке. Ко второй группе факторов относятся условия окружающей среды. Колебания освещенности могут привести к появлению шума, снижению контрастности и нарушению алгоритмов обнаружения объектов, что требует применения надежных методов компьютерного зрения. Предложено решение задач, повышающее качество контента дополненной реальности и имеющее ключевое значение для создания и развития систем ДР.

Ключевые слова: аппаратно-программные средства, объединение датчиков, условия окружающей среды, компьютерное зрение, данные в реальном времени

Вклад авторов

Круглова Л.В. — общее руководство и планирование исследования, валидация; Сисей Ф.К. — написание текста, визуализация; Самб Р. — проведение исследования. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Kruglova L.V., Ceesay F.K., Samb R. Factors influencing the formation of augmented reality systems // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 70–80. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-70-80> EDN: HMGJLL

Introduction

In the rapidly advancing field of augmented reality (AR), the seamless integration of virtual elements into the physical world relies on more than just sophisticated software; it is also governed by a range of different factors. These factors affect every stage of AR model formation, from data capture and processing to rendering and user interaction, ultimately determining the system's accuracy, responsiveness, and overall user experience [1; 2].

Sensor quality and calibration are the backbone of reliable data acquisition. High-resolution cameras, wide dynamic-range sensors, and precise inertial measurement units (IMUs) deliver detailed visual and motion data, whereas low-fidelity devices can introduce latency, drift, and jitter. Regular calibration and sensor fusion techniques are essential for minimizing these errors and maintaining stable virtual overlays [3; 4].

Positioning and tracking accuracy depend on technologies such as GPS, visual-inertial odometry, and marker-based systems, all of which are susceptible to environmental interferences, such as multipath signal reflections, occlusions, and sensor noise. Ensuring precise alignment between the real and virtual worlds requires continuous refinement of Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) algorithms and redundancy in tracking methods [5; 6].

Network performance is another critical factor, especially for cloud-assisted AR and multi-user experiences. Bandwidth limitations and latency can cause frame drops, synchronization issues, and delayed rendering, thereby undermining immersion. Leveraging edge computing and efficient data compression strategies help alleviate these network constraints and enable low-latency, high-fidelity AR interactions [7].

Furthermore, the complexity of physical environments, which are characterized by reflective

surfaces, dynamic objects, and clutter, poses significant challenges for scene understanding and object recognition. Advanced environment-aware algorithms that adapt to changing conditions are necessary to maintain accurate and stable virtual content placement [8].

This study explores the key factors shaping the formation of AR systems, including technological advancements and environmental conditions [9].

1. Methods

1.1. Technological Advancements

Technological advancements are perhaps the most critical factor influencing AR (Figure 1). The evolution of hardware and software has dramatically enhanced AR capabilities. High-performance mobile devices, such as smartphones and tablets, have made AR accessible to a wider audience. The integration of advanced sensors (e.g., accelerometers, gyroscopes, and depth sensors) allows for more accurate tracking and interaction with the physical environment.

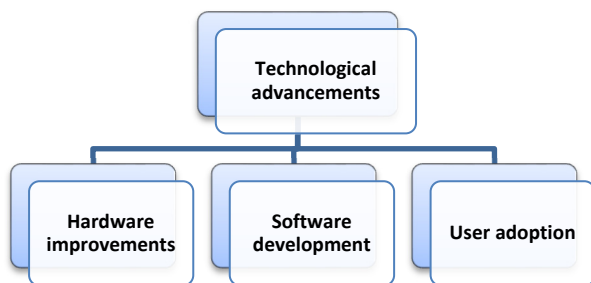


Figure 1. Technological advancements

Source: by F.K. Ceesay.

Moreover, dedicated AR hardware, such as smart glasses and head-mounted displays (HMDs), has further enriched user experiences. Devices such as Microsoft HoloLens and Magic Leap One enable hands-free interaction, making AR applications more practical in fields such as healthcare, education, and manufacturing.

On the software side, innovations in computer vision and machine learning have improved object recognition and tracking, which are essential for

creating realistic AR experiences. Development platforms such as ARKit (Apple) and ARCore (Google) have simplified the creation of AR applications, fostering innovation and lowering barriers for developers [10; 11].

User adoption of AR applications affects user attention and behavior [12].

1.1.1. Hardware Improvements

Hardware improvements are key to advancing AR model formation, as they directly affect data quality, processing speed, user comfort, and overall system robustness. Major areas of enhancement include [13]:

Sensor Upgrades. Higher-resolution cameras and global-shutter imagers reduce motion blur and capture finer scene details, thereby improving feature detection.

Wide dynamic range (WDR) and High dynamic range (HDR) sensors handle extreme lighting contrasts (sunlit exteriors vs. dim interiors) more reliably.

Integrated depth sensors (time-of-flight, structured light, or LiDAR) provide real-time 3D geometry, boosting SLAM accuracy in feature-poor or textureless environments.

Miniaturized, low-noise IMUs (accelerometers, gyroscopes, and magnetometers) with on-chip temperature compensation reduce drift and jitter in motion tracking.

Display and Optics. Next-generation waveguide optics (diffractive or holographic) and pancake lenses enable slimmer and lighter AR glasses with wider fields of view (FOV) and improved brightness uniformity.

Micro-LED and OLED microdisplays offer higher pixel density, better contrast ratios, and lower latency than conventional LCDs, leading to sharper and more stable virtual overlays [14].

Adaptive focus and varifocal modules reduce eye strain by dynamically adjusting the focal distances to match the virtual content depth [15].

Compute and Power. Dedicated vision and AI accelerators (NPU, VPU) on edge devices accelerate neural network inference for object recognition, semantic segmentation, and visual-

inertial odometry, reducing the reliance on cloud processing.

Heterogeneous multicore Systems on a Chip (SoCs) combine CPUs, GPUs, DSPs, and NPUs to balance real-time rendering, physics simulation, and computer vision tasks efficiently.

Advanced power-management Integrated Circuits (ICs) and high-capacity, fast-charging batteries extend the operation time without compromising temperature control. Improved thermal designs (vapor chambers and graphite shields) maintain performance under sustained loads.

Connectivity. Integrated 5G/6G modems with multi-gigabit throughput and ultra-low latency support cloud-assisted AR, large-scale multiplayer synchronization, and the remote streaming of complex 3D assets.

Wi-Fi 6/6E and Bluetooth LE Audio modules enable robust, low-latency local networking for device clusters, peripherals, and audio/video offload.

Form Factor and Ergonomics. The use of lightweight composite materials (carbon fiber and magnesium alloys) and balanced weight distribution reduce user fatigue, allowing longer sessions.

Modular hardware architectures allow developers to swap sensors, batteries, or compute modules to suit specific use cases, from industrial inspections to medical training [16].

Improved user interfaces (eye tracking, hand tracking, and voice control) offload mechanical controls, streamlining interactions and reducing accessory bulk [17].

Advancements across these hardware domains, including the integration of high-fidelity sensors, advanced display technologies, dedicated accelerators, next-generation connectivity, and ergonomic design, enable AR systems to achieve more accurate environment mapping, faster and more reliable rendering, and a substantially improved user experience.

1.1.2. Software Development

In modern software development for AR, a developer must integrate multiple subsystems, including real-time rendering, sensor processing, networking, and user interaction, into a cohesive,

high-performance application [18]. The key considerations and best practices are as follows:

- **Modular System Architecture.** Layers such as rendering, sensor fusion, user interfaces (UI), and networking are isolated into distinct modules or services.

Modern AR systems are configured using a plugin-based design, in which components (e.g., tracking engines) can be swapped out without rewriting the core logic.

- **Choice of Engines and SDKs:**

Cross-platform frameworks: Unity and Unreal Engine offer extensive AR toolkits (AR Foundation, ARCore, and ARKit) for mobile and headset targets.

Native SDKs: when performance is critical, services can tap directly into ARKit (iOS) or ARCore (Android) APIs, bypassing engine overhead.

- **Sensor Fusion and Real-Time Data Handling:**

Time synchronization: Linear interpolation or hard-ware triggers can be used to align IMU, camera, and depth sensor timestamps.

Filtering: Extended Kalman filters (EKF) or complementary filters are employed to merge noisy streams and minimize drift.

- **Advanced Computer Vision Pipelines:**

Feature extraction: The combination of classical algorithms (ORB, FAST) with lightweight neural networks (MobileNet-based) provides robust detection under varied conditions.

Semantic understanding: Using on-device inferencing to recognize objects and surfaces enables context-aware interactions.

- **Graphics and Rendering Optimizations:**

Level-of-Detail (LOD): Dynamically adjusting mesh complexity based on distance and screen size maintains 60–90 FPS on mobile GPUs.

GPU instancing and batching: Reducing draw calls by grouping identical objects and materials enables to leverage compute shaders for offloading physics or lighting tasks.

- **Networking and Distributed Experiences:**

Low-latency protocols: UDP-based transports (e.g., WebRTC and QUIC) with forward-error correction can be used for real-time multi-user synchronization.

State reconciliation: The implementation of client-side prediction and server-authoritative state snapshots helps to hide interpolation delays.

- Continuous Integration / Continuous Deployment (CI/CD):

Automated testing: Device farms or emulators to run unit, integration, and performance tests should be created for every commit.

Build automation: Script builds for iOS, Android, and XR headsets, packaging assets, and running acceptance tests should be fulfilled before release.

- User Experience (UX), Accessibility, and Safety:

User comfort: Monitoring and reducing latency (motion-to-photon < 20 ms) and frame drops can be useful to prevent motion sickness [19].

Natural inputs: Fallback controls (touch, gamepad) when gesture or eye-tracking fails, and interfaces should meet accessibility guidelines.

- Security, Privacy, and Compliance:

Data encryption: Sensor streams and user metadata in transit (TLS) and at rest (AES) should be protected from hacking.

Consent and anonymity: The implementation of opt-in mechanisms and anonymized spatial maps should adhere to GDPR/CCPA.

- Debugging and Profiling:

Real-time dashboards: Telemetry (frame time, memory usage, and sensor latency) should be exposed in-app or via remote logging.

Offline analysis: Sensor streams and render logs should be recorded for post-mortem analysis when tracking issues arise in the field.

By following these principles and leveraging the right combination of engines, SDKs, and toolchains, software developers can deliver robust and high-fidelity AR applications that perform well across devices and use cases.

1.1.3. User Adoption

User adoption of augmented reality depends on perceived value, ease of use, trust, and support. The key factors and strategies include [20]:

- Perceived Usefulness and Relevance

Tailored AR experiences to real user needs can be used in training, maintenance, retail visualization, and navigation.

Return on investment (ROI) can be demonstrated through case studies and pilot programs before full deployment.

- Ease of Use and Onboarding. Intuitive user interfaces with familiar gestures and minimal steps improve user efficiency.

Step-by-step tutorials, contextual tooltips, and guided tours on the first use ensure successful operation.

- Trust and Reliability. Stable tracking, fast load times, and accurate overlays build user's confidence.

Users should be clearly informed about data usage and privacy policies and be able to opt-in controls for location and camera access.

- Learning Curve and Training.

Micro-learning modules and in-app help for new users to delve into the subject.

Gamification (e.g., badges, leaderboards, and achievement tracking) motivates users' exploration activities.

- Accessibility and Inclusivity.

Hardware and Software should support multiple input methods (touch, voice, gestures) and adapt to different physical users' abilities.

Localized languages and cultural assets advance people's communication.

- Social Proof and Network Effects

Sharing AR content on social media and collaboration features for teams encourage the further development of AR technologies.

Early adopters and influencers can generate word-of-mouth referrals to popularize AR.

- Incentives and Business Models

Freemium or trial models can decrease entry barriers.

Discounts, loyalty rewards, or exclusive virtual content activate users' interest and attention.

- Technical Support and Community

Maintaining active support channels, including forums, chatbots, and help desks, facilitates user

engagement and promotes the adoption of AR technologies.

Developer and user communities, where tips, custom assets, and extensions can be shared, help users exchange information.

■ **Performance Monitoring and Iteration**

Monitoring metrics, such as session duration, feature utilization, task completion rates, and drop-off points, provides a foundation for evaluating the effectiveness of AR systems.

A/B testing can be used to refine onboarding flows, UI layouts, and content relevance.

■ **Long-Term Engagement**

Regularly updated AR content should be implemented according to user feedback and emerging needs.

Seasonal or thematic experiences can be organized to re-engage dormant users.

By addressing factors such as efficiency, productivity, usability, and continuous improvement, researchers can promote higher adoption rates and sustained use of AR solutions.

1.2. Environmental Conditions

Environmental conditions play a critical role in the performance of AR systems (Figure 2).

In particular, fluctuations in illumination can significantly degrade the quality of the input data by introducing sensor noise, reducing image contrast, and impairing the robustness of object detection and recognition algorithms. Variations in lighting may arise from natural sources (e.g., sunlight intensity changes and shadows) or artificial sources (e.g., indoor lighting flicker and reflections), and these factors directly affect the accuracy of feature extraction and tracking.

To mitigate these effects, AR systems employ reliable computer vision techniques, such as adaptive histogram equalization, denoising filters, and photometric normalization. Furthermore, multi-sensor fusion strategies that combine visual data with inertial or depth sensors are increasingly adopted to ensure robust performance under varying environmental conditions. These approaches enable AR systems to maintain stability, accuracy, and usability in real-world scenarios.

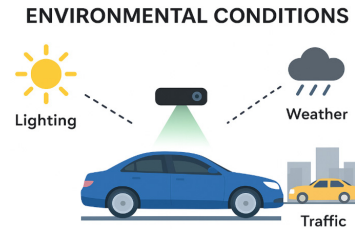


Figure 2. Environmental conditions
Source: by F.K. Ceesay.

2. Formation of the Augmented Reality Systems

The algorithm for AR system formation is based on the integration of multiple computational and perceptual processes that ensure robust, context-aware augmentation of the physical environment.

The formation process can be divided into four major stages:

- processing environmental conditions, including improving the images with methods of denoising and contrast enhancement;
- creating a model of the surrounding space;
- generating digital content;
- placing digital content in the modelled space.

2.1. Processing Environmental Conditions

The Processing Environmental Conditions algorithm is designed to enhance and normalize visual data captured from vehicle-mounted cameras or other environmental sensors operating under varying lighting and weather conditions (Figures 3 and 4). Its primary objective is to improve the image quality, visibility, and reliability for downstream applications such as AR spatial modelling, autonomous navigation, and environmental visualization.

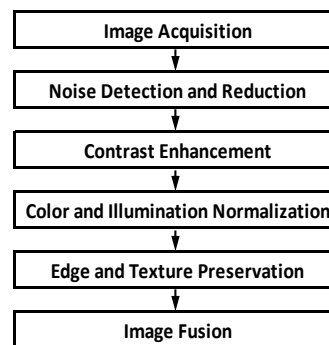


Figure 3. Algorithm: processing environmental conditions
Source: by F.K. Ceesay.

Algorithm: Processing Environmental Conditions

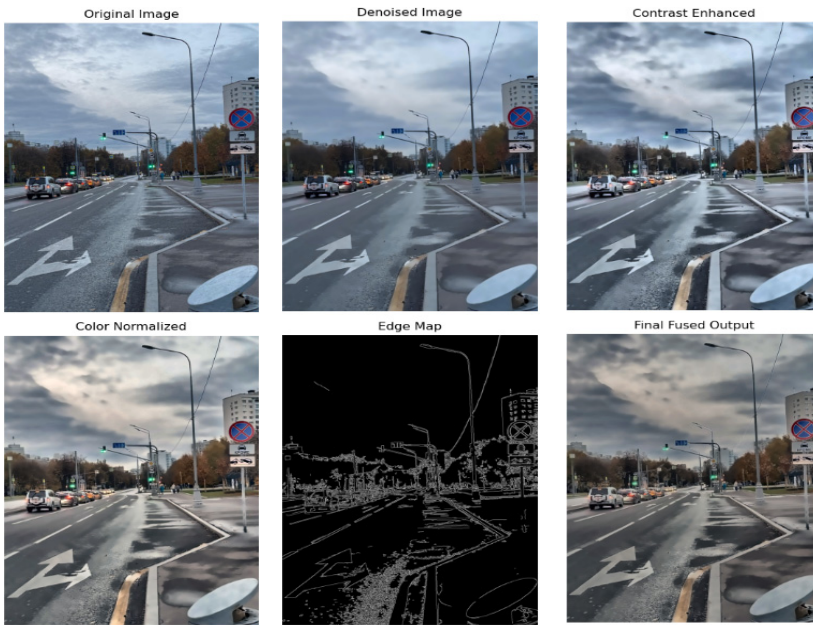


Figure 4. Result of algorithm: processing environmental conditions
 Source: by F.K. Ceesay.

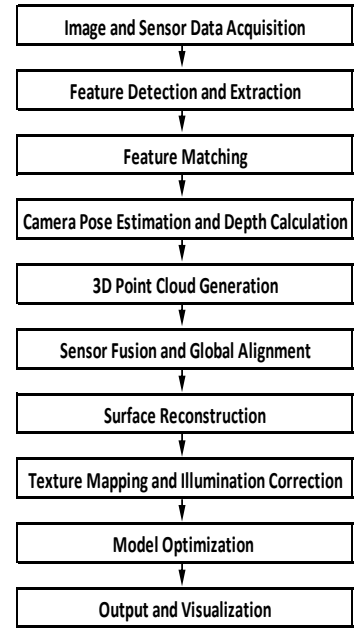


Figure 5. Algorithm: creating a model of the surrounding space
 Source: by F.K. Ceesay.

This algorithm performs a sequence of image-processing operations to remove unwanted noise, improve contrast, balance illumination, and preserve essential visual features, such as edges and textures. By fusing enhanced color and edge information, the algorithm produces a high-quality image output suitable for accurate spatial interpretation and object recognition in dynamic environments.

2.2. Creating a Model of the Surrounding Space

This algorithm simulates the process of **creating a 3D spatial model of an environment** from a single image (as if captured by a vehicle-mounted camera or drone) (Figures 5 and 6).

It extracts features, generates depth, and visualizes the **3D point cloud**.



Figure 6. Result of the algorithm: creating a model of the surrounding space
 Source: by F.K. Ceesay.

2.3. Generating Digital Content

The algorithm is a simulation that generates and visualizes **digital content** (such as AR objects) placed in a **3D spatial environment** (Figures 7, 8). It uses environmental data (weather, light, and temperature) to decide what kind of digital content to place and where. Finally, everything is rendered in a **3D plot**.

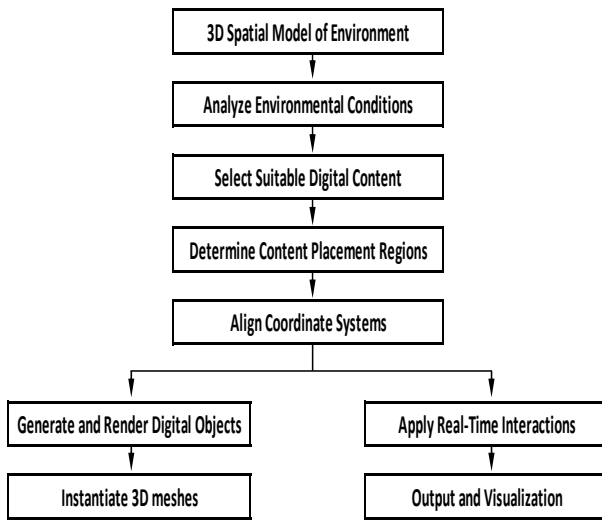


Figure 7. Algorithm: generating digital content
Source: by Fafa K. Ceessay.

2.4. Placing Digital Content in the Modelled Space

The algorithm generates a 3D terrain, detects flat areas suitable for placing digital content, selects content based on environmental conditions (such as weather), assigns the content to those flat regions, and visualizes everything in a 3D plot (Figures 9, 10).

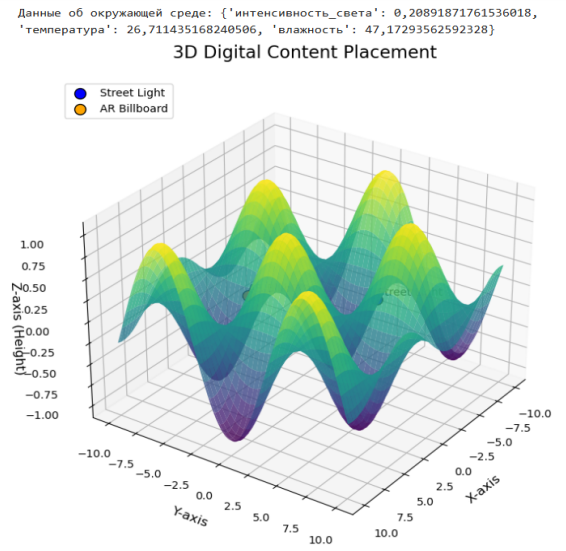


Figure 8. Result of the Algorithm: Generating digital content
Source: by F.K. Ceessay.

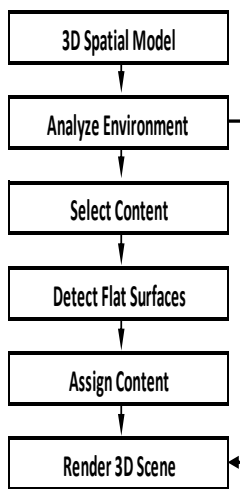


Figure 9. Algorithm: Place digital content in modelled 3D space
Source: by F.K. Ceessay.

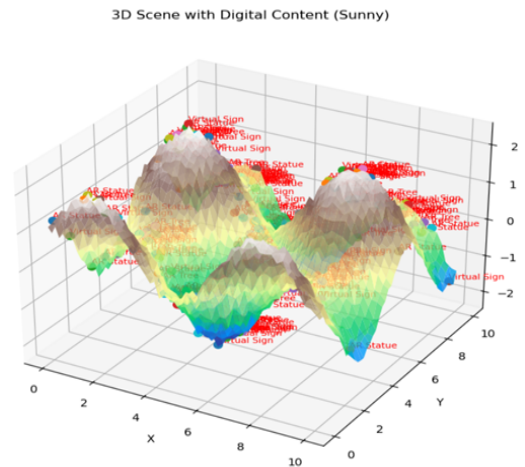


Figure 10. Result of the algorithm: place digital content in modelled 3D space
Source: by Fafa K. Ceessay.

3. Results

The analysis shows that the formation of Augmented Reality systems is not driven by a single determinant but emerges from the interaction of eight classes of factors.

First, hardware constraints (processor performance, display type, battery capacity, and sensor fidelity) establish the physical and computational limits of the system.

Second, tracking and registration accuracy, governed by the tracking strategy, environmental cues, and latency, directly affects the stability and utility of the augmentations.

Third, software architecture and platform choices, including framework selection, operating system support, and cloud/on-device distribution, shape the system's extensibility and real-time behavior.

Fourth, human — computer interaction factors, such as the field of view, interaction modality, ergonomics, perceptual comfort, and cognitive load, determine how augmentation can be safely and effectively consumed by users.

Fifth, the content and experience design requirements (realism level, scene understanding depth, dynamicity, and multi-user support) influence both the data pipelines and runtime complexity.

Sixth, environmental conditions, particularly lighting, texture richness, and outdoor variability, mediate the reliability of perception and alignment.

Seventh, business and ecosystem forces, including the target industry, integration cost, and market maturity, constrain viable design trade-offs.

Finally, considerations related to privacy, security, and ethics, particularly continuous sensing and bystander exposure, establish normative and regulatory constraints on the development of AR systems. Collectively, these factors shape the technical architecture, define the boundaries of usability, and influence the feasibility of AR deployment.

4. Discussion

The program's performance and efficiency confirm the effectiveness of the proposed method for processing environmental data in combination with the fused data from object-mounted sensors.

The results of the developed AR system confirm the feasibility of using a combined pipeline of

image preprocessing, environment modeling, digital content generation, and spatial placement for effective augmented reality applications. Several aspects merit further discussion.

1. *Robustness under environmental conditions:*

The system demonstrated resilience to fluctuations in illumination and noise through preprocessing methods such as denoising and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE). This confirms earlier findings that reliable preprocessing is essential for object detection and AR overlay stability.

2. *Accuracy of environment modeling:* The integration of vision-based reconstruction with multi-sensor fusion yielded a more stable and accurate digital model of the surrounding space. This supports the claims in the literature that combining camera vision with IMU or depth data enhances spatial consistency.

3. *Real-time performance:* Experimental results show that the pipeline can operate in real time, although the computational demands increase with higher resolution inputs and more complex overlays. This balance between speed and fidelity is a common challenge in AR development.

4. *User-centered functionality:* The program's ergonomic and accessibility features make it adaptable to various user groups. However, large-scale usability studies are required to fully validate these claims.

5. *Limitations:* Despite its robustness, the system faces challenges in highly dynamic environments, where rapid motion and occlusions reduce feature-matching accuracy. Additionally, sensor calibration remains critical for maintaining spatial alignment.

6. *Future Directions:* Future work should focus on optimizing computational efficiency using GPU acceleration, expanding multi-sensor integration (e.g., LiDAR), and improving the semantic understanding of the environment for context-aware AR overlays.

Conclusion

The formation of AR systems is shaped by a multifaceted array of factors that collectively influence their development, adoption and effectiveness. Technological advancements serve as primary

drivers, enabling more sophisticated hardware and software solutions that enhance user experience and broaden the applicability of AR across various sectors.

Understanding these factors is essential for stakeholders in the AR ecosystem, including scientists, developers, and programmers. By recognizing and addressing these influences, they can create more effective, user-centered AR solutions that not only meet market demands but also foster broader acceptance and integration of augmented reality into everyday life. As AR continues to evolve, the interplay of these various factors will remain critical in shaping its future trajectory and potential impact on society.

This study has presented the development and evaluation of an algorithm for the formation of AR systems. The proposed pipeline, consisting of environmental preprocessing, modeling of the surrounding space, digital content generation, and spatial placement, demonstrated its effectiveness in creating a stable and functional AR environment.

Key Findings:

Robustness to environmental conditions: Pre-processing techniques, such as denoising and CLAHE, significantly improved visual clarity, ensuring reliable performance under fluctuating lighting and noise.

Improved environmental modeling: The integration of computer vision techniques with multi-sensor fusion enabled the creation of accurate and stable digital representations of the physical environment.

Real-time capability: The system successfully achieved real-time performance, making it suitable for interactive applications.

Usability and ergonomics: The program was designed using user-centered principles to enhance ease of use, accessibility, and safety.

Future Work. Despite these achievements, some limitations remain, including challenges in highly dynamic scenes and the need for precise sensor calibration. Future studies should explore GPU acceleration, semantic environment understanding, and broader usability testing to further enhance the robustness and adaptability of AR systems.

In conclusion, the developed AR system confirms the feasibility of combining advanced computer vision with sensor fusion to achieve practical, robust, and user-friendly augmented reality applications.

References

1. Azuma RT. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1997; 6(4):355–385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
2. Milgram P, Kishino F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 1994;E77-D(12):1321–1329.
3. Azuma R, Baillet Y, Behringer R, Feiner S, Julier S, MacIntyre B. Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2001;21(6):34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
2. Welch G, Bishop G. An introduction to the Kalman filter. *Department of Computer Science. University of North Carolina at Chapel Hill*. 2006;TR 95-041:1–16.
3. Mur-Artal R, Tardós JD. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. *IEEE Transactions on Robotics*. 2017;33(5):1255–1262. <https://doi.org/10.1109/TRO.2017.2705103>
4. Davison AJ, Reid ID, Molton ND, Stasse O. MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2007; 29(6):1052–1067. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1049>
5. Schmalstieg D, Höllerer T. Augmented Reality: Principles & Practice. *Addison-Wesley Professional*. 2016. <https://books.google.co.in/books?id=Y4r-ngEACAAJ>
6. Billinghurst M, Clark A, Lee G. A survey of augmented reality. *Foundations and Trends in Human — Computer Interaction*. 2015;8(2-3):73–272. <https://doi.org/10.1561/11000000049>
7. Ong SK, Nee AYC. Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing. *Springer London*. 2013. <https://books.google.ru/books?id=ETnTBwAAQBAJ>
8. Permozer I, Orehovački T. Utilizing Apple's ARKit 2.0 for Augmented Reality Application Development. *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*; 2019 May 20–24. Opatija, Croatia. IEEE; 2019. p. 1629–1634. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2019.8756928>
9. Nowacki P, Woda M. Capabilities of ARCore and ARKit Platforms for AR/VR Applications. In: Zamojski W, Mazurkiewicz J, Sugier J, Walkowiak T, Kacprzyk J, editors. *Engineering in Dependability of Computer Systems and Networks*. Proceedings of the Fourteenth International Conference on Dependability of Computer Systems DepCoS-RELCOMEX; 2020 Jul 1–5. Cham: Springer; 2020. p. 358–370. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19501-4_36

10. Zhou T. Examining User Adoption of Mobile Augmented Reality Applications. *International Journal of E-Adoption*. 2018;10(2):37–49. <https://doi.org/10.4018/IJEA.2018070103>
11. Zhou F, Duh HB-L, Billinghurst M. Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR. *2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. 2008 Sep 15–18; Cambridge. IEEE; 2008. p. 193–202. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2008.4637362>
12. Stauffert JP, Niebling F, Latoschik ME. Latency and Cybersickness: Impact, Causes, and Measures. *A Review. Frontiers in Virtual Reality*. 2020. <https://doi.org/10.3389/FRVIR.2020.582204>
13. Livingston MA, Rosenblum LJ, Brown DG, Schmidt GS, Julier SJ, Baillot Y, et al. *Military applications of augmented reality. Handbook of Augmented Reality*. Naval Research Laboratory. New York; Springer; 2011. p. 671–706. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0064-6_31
14. Caudell TP, Mizell DW. Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*; 1992 Jan 07–10; Kauai, HI, USA. IEEE; 2002. p. 659–669. <https://doi.org/10.1109/HICSS.1992.183317>
15. Kiyokawa K. Head-Mounted Display Technologies for Augmented Reality. *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. 2015;59–84. <https://doi.org/10.1201/b18703>
16. Billinghurst M, Kato H, Poupyrev I. The Magic Book: A transitional AR interface. *Computers & Graphics*. 2001;25(5):745–753. [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(01\)00117-0](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(01)00117-0)
17. Stratulat A, Roussarie V, Vercher J-L, Bourdin C. Improving the realism in motion-based driving simulators by adapting tilt-translation technique to human perception. *2011 IEEE Virtual Reality Conference*; 2011 Mar 19–23; Singapore. IEEE; 2011. p. 47–50. <https://doi.org/10.1109/VR.2011.5759435>
18. Willemsen P, Colton MB, Creem-Regehr SH, Thompson WB. The effects of head-mounted display mechanics on distance judgments in virtual environments. *Proceedings of the 1st Symposium on Applied perception in graphics and visualization (APGV '04)*; 2004 Aug 7–8; Los Angeles, California, USA. New York, NY, United States; 2004. p. 35–38. <https://doi.org/10.1145/1012551.1012558>

About the authors

Larisa V. Kruglova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2920-9463, ORCID: 0000-0002-8824-1241; e-mail: kruglova-lv@pfur.ru

Fafa K. Ceesay, PhD student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6762-9231; e-mail: 1042225144@rudn.ru

Rokhaya Samb, PhD student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-6787-3517; e-mail: 1042225241@rudn.ru

Сведения об авторах

Круглова Лариса Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-code: 2920-9463, ORCID: 0000-0002-8824-1241; e-mail: kruglova-lv@pfur.ru

Сисей Фафа К., аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-6762-9231; e-mail: 1042225144@rudn.ru

Самб Рокхая, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0000-6787-3717; e-mail: 1042225241@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-81-92

EDN: HNVBCJ

Научная статья / Research article

Исследование точностных параметров волоконно-оптического гироскопа для малогабаритного инерциального измерительного блока

А.В. Орешкин^a, А.С. Жульков^a, С.Н. Сидоров^a, Д.Ю. Поленов^b

^a Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники», Королев, Российская Федерация

^b Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана,

Мытищи, Российская Федерация

✉ oreshkins76@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 августа 2025 г.

Доработана: 20 октября 2025 г.

Принята к публикации: 30 октября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Рассмотрены ключевые вопросы создания волоконно-оптических гироскопов с большим диапазоном измерения угловой скорости для малогабаритного инерциального измерительного блока для широкого класса высокоманевренных объектов. Цель исследования — выходные характеристики волоконно-оптических гироскопов с диапазоном измерения угловой скорости более $300^\circ/\text{с}$, погрешность нулевого сигнала волоконно-оптических гироскопов от запуска к запуску, погрешность нулевого сигнала волоконно-оптических гироскопов при различной температуре для возможности применения в составе инерциального измерительного блока. Представлены результаты исследований выходной характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов по диапазону измерения угловой скорости, температуры и от включения к включению для малогабаритного инерциального измерительного блока (ИИБ). Методология исследования строилась на принципе построения волоконно-оптического гироскопа без обратной связи с принципом прямого преобразования, принцип действия которого основан на эффекте Саньяка. Дополнительно исследована возможность применения волоконно-оптических гироскопов с рабочей длиной оптической волны 1,3 и 1,75 мкм и большим диапазоном измерения угловой скорости, что подтверждает целесообразность их использования в составе малогабаритного ИИБ.

Ключевые слова: эффект Саньяка, волоконно-оптический гироскоп, погрешность нулевого сигнала, погрешность от запуска к запуску, приборостроение

Вклад авторов

Орешкин А.В. — анализ научной литературы, выводы и рекомендации, разработка программ и методик испытаний, устранение ошибок в проектном решении, подготовка текста рукописи; Жульков А.С. — общая концепция исследования; Сидоров С.Н., Поленов Д.Ю. — методология проведения экспериментальных исследований для обеспечения заданных требований к малогабаритному ИИБ. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Орешкин А.В., Жульков А.С., Сидоров С.Н., Поленов Д.Ю. Исследование точностных параметров волоконно-оптического гироскопа для малогабаритного инерциального измерительного блока // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 81–92. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-81-92> EDN: HNVBCJ

© Орешкин А.В., Жульков А.С., Сидоров С.Н., Поленов Д.Ю., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Investigation of the Accuracy Parameters of a Fiber-Optic Gyroscope for a Small-Sized Inertial Measuring Unit

Alexander V. Oreshkin^a, Alexander S. Zhulkov^a,
Sergey N. Sidorov^a, Dmitry Yu. Polenov^b

^a Joint-Stock Company Scientific and Production Association of Measuring Equipment, *Korolev, Russian Federation*

^b Mytischki Branch of BMSTU, *Mytischki, Russian Federation*

✉ oreshkins76@yandex.ru

Article history

Received: August 14, 2025

Revised: October 20, 2025

Accepted: October 30, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The study addresses key issues in the development of fiber-optic gyroscopes with an extended angular velocity measurement range for a Small-Sized Inertial Measuring Unit intended for a wide class of highly maneuverable objects. The study focuses on the output characteristics of fiber-optic gyroscopes with an angular velocity range exceeding 300°/s, as well as on zero-bias error between successive power-on cycles and zero-bias error under varying temperature conditions, with a view to their integration into a Small-Sized Inertial Measuring Unit. The results of experimental investigations into the output characteristics of fiber-optic gyroscopes (FOG) are presented, including their performance over the angular velocity range, across temperature variations, and under repeated power-on conditions for a Small-Sized Inertial Measuring Unit (IMU). The research methodology is based on the design of an open-loop fiber-optic gyroscope employing direct conversion, with its operating principle derived from the Sagnac effect. In addition, the feasibility of using fiber-optic gyroscopes operating at optical wavelengths of 1.3 μm and 1.75 μm with an extended angular velocity range has been examined. The findings confirm the suitability of such gyroscopes for incorporation into a Small-Sized Inertial Measuring Unit.

Keywords: Sagnac effect, fiber-optic gyroscope, zero signal error, inertial measurement unit, error from launch to launch, instrumentation

Authors' contribution

Oreshkin A.V. — literature review, formulation of conclusions and recommendations, development of testing programs and procedures, correction of design errors, and manuscript preparation; *Zhulkov A.S.* — overall research concept; *Sidorov S.N., Polenov D.Yu.* — development of the experimental research methodology to ensure compliance with the specified requirements for the Small-Sized Inertial Measuring Unit. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Oreshkin AV, Zhulkov AS, Sidorov SN, Polenov DYu. Investigation of the accuracy parameters of a fiber-optic gyroscope for a small-sized inertial measuring unit. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):81–92. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-81-92> EDN: HNVBCJ

Введение

Передовой технологией в производстве инерциальных измерительных блоков (ИИБ) является технология волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), принцип действия которых основан на эффекте Саньяка¹ [1]. ИИБ на базе

таких гироскопов не имеет подвижных частей, абсолютно бесшумна и не требует специального обслуживания и имеет хорошие показатели наработки на отказ (до 80 000 часов у некоторых моделей) и малое энергопотребление (десятки Ватт). Технологии ВОГ пришли на смену лазерно-кольцевым гироскопам (ЛКГ), имеющим

¹ *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем : учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург : ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с. ISBN 978-5-900780-73-3 EDN: QNWJZT

подвижные части и требующим периодического обслуживания по калибровке и замене износившихся узлов и деталей, а также с относительно высоким уровнем энергопотребления [2; 3].

Фундаментальной задачей, частичные результаты которой представлены в данной статье, является удовлетворение требованиям технического задания на разработку ИИБ. Требования технического задания на разработку ИИБ

в части датчиков измерения угловой скорости представлены в таблице.

При разработке ВОГ учитывались современные тенденции разработки ВОГ таких организаций, как АО «Физоптика» (группа ВГ 103), ООО НПК «Оптолинк» (гироскопы ОИУС200, ОИУС501) и АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», продукция которых удовлетворяет требованиям в заявленном техническом задании.

Требования технического задания на разработку ИИБ в части датчиков измерения угловой скорости
Requirements of the technical specification for the development of IMU in terms of sensors for measuring angular velocity

Параметр / Parameter	Значение / Value
Диапазон измеряемых скоростей, °/с / The range of measured speeds, °/s	± 300
Погрешность масштабного коэффициента, % / The error of the scale factor, %	0,05
Рабочая полоса частот, Гц / Operating frequency band, Hz	(0...400)
Случайный дрейф нуля при термокомпенсации, ч / Random zero drift during thermal compensation, hour	< 0,15
Спектральная плотность мощности шума, °√ч / Noise power spectral density, °√hour	0,02
Диапазон рабочих температур, °C / Operating temperature range, °C	(-60 ... + 60)
Напряжение питания, В / Supply voltage, V	(5±0,25)
Случайный дрейф нуля от запуска к запуску, °√ч / Random zero drift from launch to launch, °√hour	< 5
Потребляемая мощность, Вт / Power consumption, W	< 7
Выходной сигнал, с / Output signal, s	RS-422
Время готовности / Readiness time	3
Допустимая влажность, % / Permissible humidity, %	(0...80)
Масса, кг / Mass, kg	< 0,15

Источники: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.
 Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

При выборе направлений исследований по данному вопросу учитывался мировой опыт развития гироскопической техники, однако предпочтение было отдано реальному состоянию отечественной промышленности, учитывая потенциальную область применения ИИБ.

Существует два основных принципа построения волоконно-оптического гироскопа [4]:

- гироскоп с обратной связью с частотным выходом;
- гироскоп без обратной связи с принципом прямого преобразования.

Основным преимуществом первого варианта является линейный выход, отсутствие необходимости применять АЦП и большой диапазон измерения. В то же время достижение прием-

лемых характеристик требует применения сложной технологической базы, что приводит к удорожанию продукции. Кроме того, частотный выход требует проведения операции дифференцирования выходной информации при оценке угловой скорости, необходимой для стабилизации изделия относительно центра масс, что приводит к необходимости уменьшения цены импульса. В ряде случаев, даже для современных изделий, необходимо иметь аналоговый выход по угловой скорости, что еще более усложняет структурную схему прибора.

Решение указанных выше задач наиболее просто решается во второй схеме в особенности при использовании аналогового выхода. При этом также удается достичь минимальных габаритов.

ритно-весовых характеристик и энергопотребления. К числу основного недостатка данной схемы относится нелинейный выход, что требует решения достаточной сложной задачи линеаризации показаний прибора [5; 6]. Как показывает опыт разработки прототипов ИИБ такими организациями, как АО «Физоптика», ПАО «ЛНППК», ООО НПК «Оптолинк» и АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор» при использовании современных микропроцессоров и наземного оборудования для калибровки, данная задача может быть успешно решена. В связи с этим в качестве основного направления в части волоконно-оптического гироскопа для дальнейших исследований принимается оптико-физическая схема без обратной связи, основными критериями точностных характеристик которой являются:

- выходные характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов по диапазону измерения угловой скорости;
- выходные характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов от запуска к запуску;
- выходные характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов при различной температуре.

1. Экспериментальные исследования выходной характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов по диапазону измерения угловой скорости для малогабаритного ИИБ

Учитывая цели исследования, были рассмотрены следующие ключевые вопросы по возможности создания волоконно-оптических гироскопов с большим диапазоном измерения угловой скорости для малогабаритного инерциального измерительного блока для широкого класса высокоманевренных объектов:

- исследование выходной характеристики волоконно-оптических гироскопов с диапазоном измерения угловой скорости более 300 °/с;

- исследование погрешности нулевого сигнала ВОГ от запуска к запуску;
- исследование нулевого сигнала ВОГ при различной температуре.

Диапазон измерения угловой скорости волоконно-оптического гироскопа без обратной связи определяется следующими факторами:

- выбором размера и длины волокна в волоконной катушке гироскопа;
- рабочим диапазоном входного напряжения АЦП;
- диапазоном выходного напряжения ВОГ по постоянному току.

Интересной особенностью для применения ВОГ без обратной связи является чувствительность датчика, которая определяется наклоном кривой модуляции, также называемой индексом модуляции. В процессе исследований необходимо также учитывать такие параметры, как диапазон измерений и мощность подключения.

Чтобы повысить чувствительность ВОГ без обратной связи, была предложена многопроходная конфигурация. В этом случае свет передается обратно от первого принимающего волокна ко второму, параллельному передающему волокну, далее ко второму принимающему волокну и так далее, пока не будет выполнено несколько проходов через промежуток. Идея заключается в том, что многократное прохождение должно повысить чувствительность, просто увеличивая потери мощности при определенном поперечном смещении передающего волокна. Возможность реализации этого была проанализирована экспериментально и теоретически в рамках работы, лежащей в основе этого тезиса [7; 8].

Выходной сигнал ВОГ без обратной связи $U_{\text{вог}}$ пропорционален синусу измеряемой угловой скорости W ³ [7; 8]:

$$U_{\text{вог}} = K_{\text{вог}} J_1(M) \cdot \sin(T_{\text{вог}} \cdot W); \quad (1)$$

$$T_{\text{вог}} = (8 \cdot p \cdot S) / (1 \cdot C),$$

³ ГОСТ Р ИСО 5725-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Введ. 01.11.2002. Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002.

где $K_{\text{об}}$ — коэффициент передачи электронного блока ВОГ; J_1 — функция Бесселя первого порядка; M — индекс модуляции; S — площадь, охватываемая оптическим контуром; l — длина оптической волны; C — скорость света.

Для обеспечения однозначности значений выходного сигнала ВОГ в рабочем диапазоне угловой скорости необходимо обеспечить следующее соотношение [9]:

$$T_{\text{вог}} \cdot W_{\text{max}} < p / 2. \quad (2)$$

Для формирования требования к длине оптического волокна в оптическом контуре ВОГ в выражение (2) подставляется формула для параметра $T_{\text{вог}}$ ⁴ [10]:

$$(8 \cdot \pi \cdot L \cdot S_k) / (C \cdot \lambda \cdot P) \Omega_{\text{max}} < \pi / 2, \quad (3)$$

где L — длина волоконного контура ВОГ; S_k — площадь катушки ВОГ; P — периметр катушки ВОГ.

Для применяемых в ИИБ АЦП типа сигма-дельта с учетом их схемы включения рабочий диапазон входного напряжения не превышает $\pm 1,25$ В, а диапазон выходного напряжения ВОГ по постоянному току составляет $\pm 1,20$ В.

Целью исследования выходных характеристик волоконно-оптических гироскопов с

диапазоном измерения угловой скорости более $300^\circ/\text{с}$ является проверка соответствия выходного сигнала ВОГ по напряжению при максимальной угловой скорости диапазону входного напряжения АЦП и проверка соответствия выходного сигнала ВОГ по напряжению при различной угловой скорости функции.

Исследования проводились на трех волоконно-оптических гироскопах, два из которых с рабочей длиной оптической волны $0,82$ мкм имели величину постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,235$ с, а один гироскоп с рабочей длиной волны $1,3$ мкм имел постоянную времени $T_{\text{вог}} \sim 0,135$ с. Соответственно, ожидаемая максимальная измеряемая угловая скорость в первом случае составляла $382^\circ/\text{с}$, а во втором — $670^\circ/\text{с}$.

На рис. 1 и 2 приведены фотографии испытываемых макетов ВОГ.

Испытание ВОГ проводилось на вращающемся основании с применением поворотного стенда. На рис. 3 приведена схема проведения испытаний. Испытания проводились с использованием следующей аппаратуры: а) поворотный стенд АССДНПУ МФУ.426441.001 ТО; б) мультиметр АРРА-109; в) ПК; г) лабораторный пульт настройки ВОГ; д) источник питания GPS-3030DD.

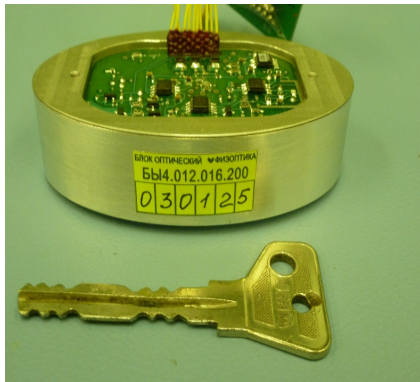


Рис. 1. ВОГ (№ 1) с рабочей длиной волны $1,3$ мкм
Источники: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.
Figure 1. Fiber-optic gyroscope (No. 1) with an operating wavelength of 1.3 microns
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

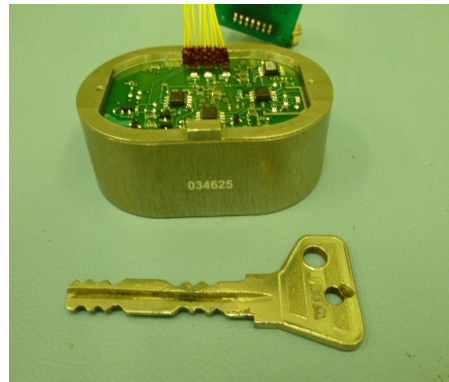


Рис. 2. ВОГ (№ 2) с рабочей длиной волны $0,82$ мкм
Источники: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.
Figure 2. Fiber-optic gyroscope (No. 2) with an operating wavelength of 0.82 microns
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

⁴ Степанов О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации: учебное пособие. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2021. 196 с.

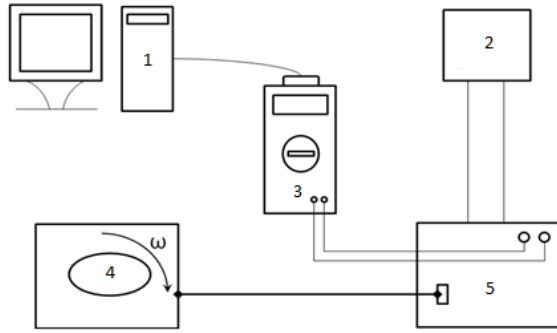


Рис. 3. Схема проведения испытаний на стенде:
 1 — ПК; 2 — источник питания;
 3 — мультиметр; 4 — ВОГ; 5 — пульт
 Источники: выполнено А.В. Орешкиным,
 А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 3. The scheme of conducting tests on the stand:
 1 — PC; 2 — power supply; 3 — multimeter;
 4 — VOG; 5 — remote control
 Source: by A.V. Oreshkin,
 A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

Измерялось значение выходного напряжения ВОГ при различной задаваемой угловой скорости от 13,5 до 243°/с. Время измерения при каждой угловой скорости составляло 2 мин.

На рис. 4–6 маркерами показаны полученные значения выходного сигнала для трех

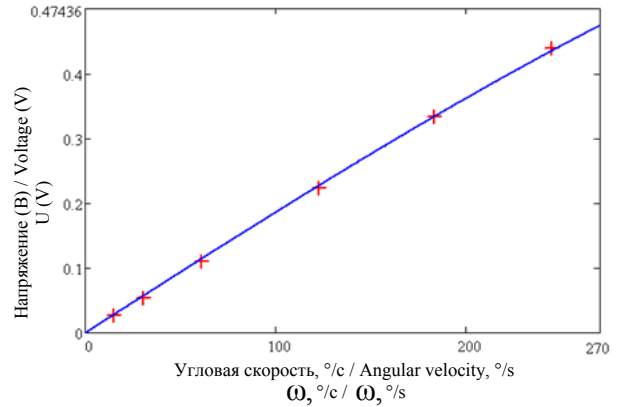


Рис. 4. Результаты измерения при различной угловой скорости сигнала ВОГ № 1 с рабочей длиной оптической волны 1,3 мкм
 Источники: выполнено А.В. Орешкиным,
 А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 4. Measurement results at different angular velocities of the FOGNo. 1 signal with an operating optical wavelength of 1.3 microns
 Source: by A.V. Oreshkin,
 A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

испытываемых ВОГ при различных угловых скоростях вращения. На этих же рисунках в виде непрерывного графика приведена расчетная зависимость выходного сигнала гироскопа от измеряемой угловой скорости согласно формуле (1).

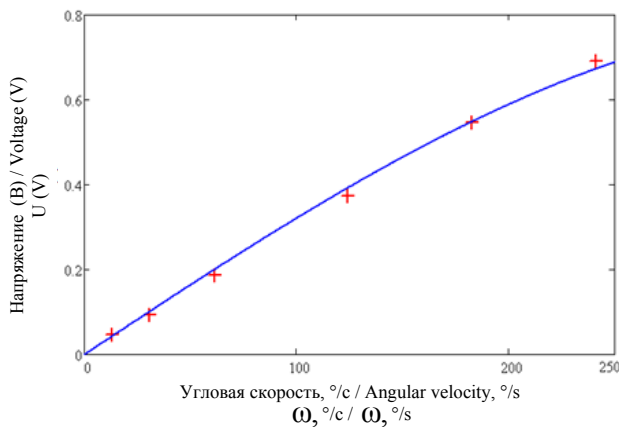


Рис. 5. Результаты измерения при различной угловой скорости сигнала ВОГ № 2 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм
 Источники: выполнено А.В. Орешкиным,
 А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 5. Measurement results at different angular velocities of the FOGNo. 2 signal with an operating optical wavelength of 0.82 microns
 Source: by A.V. Oreshkin,
 A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

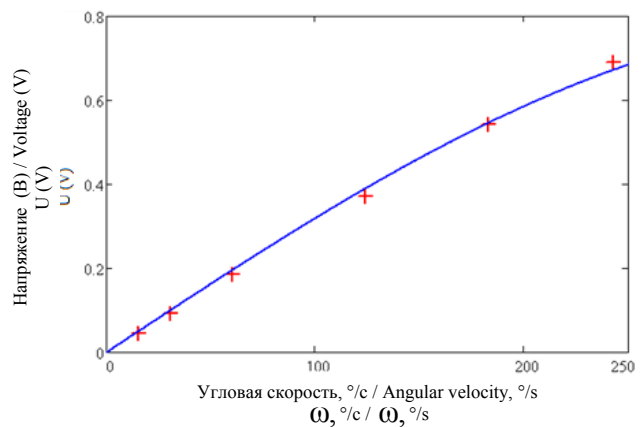


Рис. 6. Результаты измерения при различной угловой скорости сигнала ВОГ № 3 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм
 Источники: выполнено А.В. Орешкиным,
 А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 6. Measurement results at different angular velocities of the FOGNo. 3 signal with an operating optical wavelength of 0.82 microns
 Source: by A.V. Oreshkin,
 A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

Как видно из графиков, зависимость выходных сигналов всех трех ВОГ от угловой скорости близка к соответствующим теоретическим функциям. Одновременно использование расчетных функций позволяет экстраполировать экспериментальные данные по выходному сигналу для гироскопа с рабочей длиной волны на 1,3 мкм ($T_{\text{вог}} \sim 0,135$ с). Выходное напряжение данных ВОГ по постоянному току при угловой скорости $300^\circ/\text{с}$ не превысит 0,8 В, что не превышает допустимую величину входного напряжения сигма-дельта АЦП.

2. Экспериментальные исследования выходной характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов от запуска к запуску для малогабаритного ИИБ

Целью исследования погрешности нулевого сигнала ВОГ от запуска к запуску было определение при предварительных экспериментальных исследованиях возможности обеспечения заданного уровня погрешности нулевого по каналу ДУСов сигнала от запуска к запуску ($5^\circ/\text{ч}$).

Исследование погрешности нулевого сигнала ВОГ от запуска к запуску проводилось в нормальных температурных условиях.

Так же как и при измерении выходных характеристик волоконно-оптических гироскопов, исследования проводились на трех волоконно-оптических гироскопах, два из которых с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм имели величину постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,235$ с, а один гироскоп с рабочей длиной волны 1,3 мкм имел постоянную времени $T_{\text{вог}} \sim 0,135$ с.

Гироскопы находились на неподвижном основании, их оси чувствительности были ориентированы вертикально вверх.

Погрешность нулевого сигнала гироскопов определялась как случайное отклонение их средних значений в кратковременном запуске. Было выполнено 10 включений (запусков). Измерения проводились без применения алгорит-

мической компенсации температурной погрешности нулевого сигнала гироскопов.

Обработка результатов измерений осуществлялась по следующему алгоритму⁵ [11]:

$$\omega m_{\text{д}} = \varphi m_{\text{дср}} / \tau_{\text{изм}}; \quad (4)$$

$$\Omega_{\text{дср}} = (\sum \omega m_{\text{д}}) / 10; \quad (5)$$

$$\Delta \omega m_{\text{д}} = \omega m_{\text{д}} - \Omega_{\text{дср}}; \quad (6)$$

$$\delta \omega_{\text{д}} = \sqrt{\frac{\sum m (\Delta \omega m_{\text{д}})^2}{9}}; \quad (7)$$

$$D = D_x, D_y, D_z,$$

где $\varphi m_{\text{д}}$ — мгновенное значение угловой скорости при m -м включении; $\varphi m_{\text{дср}}$ — среднее значение угловой скорости за одно включение; m — номер включения; $\omega m_{\text{д}}$ — среднее значение измеренной угловой скорости при m -м включении; $\Omega_{\text{дср}}$ — среднее значение измеренной угловой скорости за 10 включений; $\Delta \omega m_{\text{д}}$ — отклонение среднего значения измеренной угловой скорости в m -м включении относительно среднего значения измеренной угловой скорости за 10 включений; $\delta \omega_{\text{д}}$ — среднеквадратическое отклонение измеренных значений угловой скорости за 10 включений.

На рис. 7–9 приведены графики значения отклонений среднего значения измеренной угловой скорости в различных включениях относительно среднего значения измеренной угловой скорости за 10 включений.

Случайная погрешность сигнала по результатам измерений (3σ) составила:

- для ВОГ № 1 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм — $\pm 1,62^\circ/\text{ч}$;
- для ВОГ № 2 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм — $\pm 2,97^\circ/\text{ч}$;
- для ВОГ № 3 с рабочей длиной оптической волны 1,3 мкм — $\pm 1,34^\circ/\text{ч}$.

Применение алгоритмической компенсации температурной погрешности нулевого сигнала гироскопов уменьшит значения случайной погрешности на 20–30 %.

⁵ Физоптика. Группа ВГ 091Б. Волоконно-оптические гироскопы. URL: <https://www.fizoptika.ru/> (дата обращения: 27.07.2025).

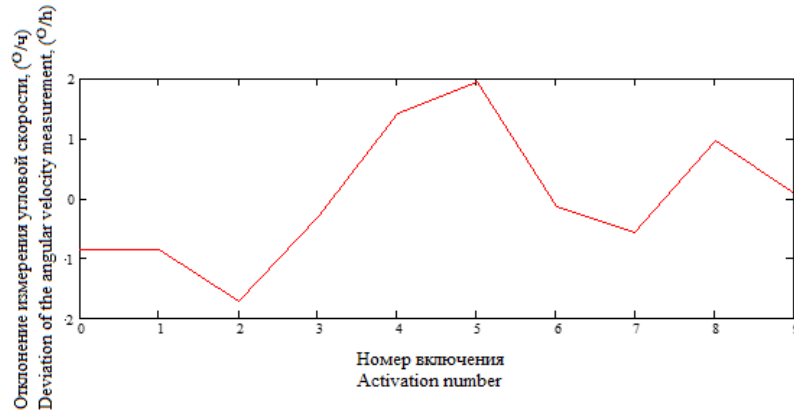


Рис. 7. Результаты измерения сигнала ВОГ № 1 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм
Источники: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 7. Measurement results of the FOG No. 1 signal with an optical wavelength of 0.82 microns
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

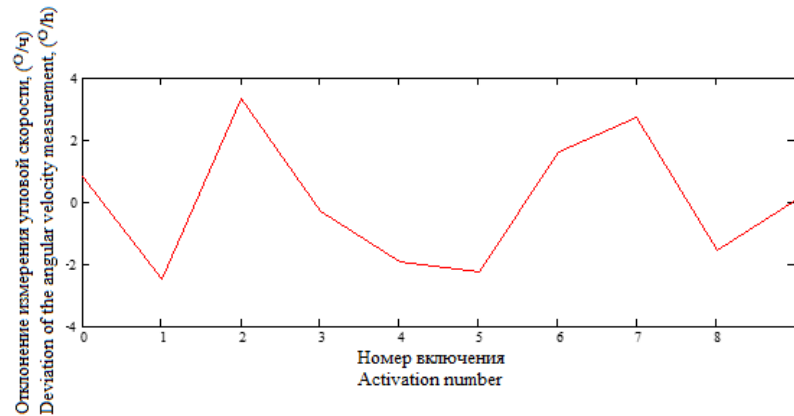


Рис. 8. Результаты измерения сигнала ВОГ № 2 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм
Источники: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 8. Measurement results of the FOG No. 2 signal with an optical wavelength of 0.82 microns
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

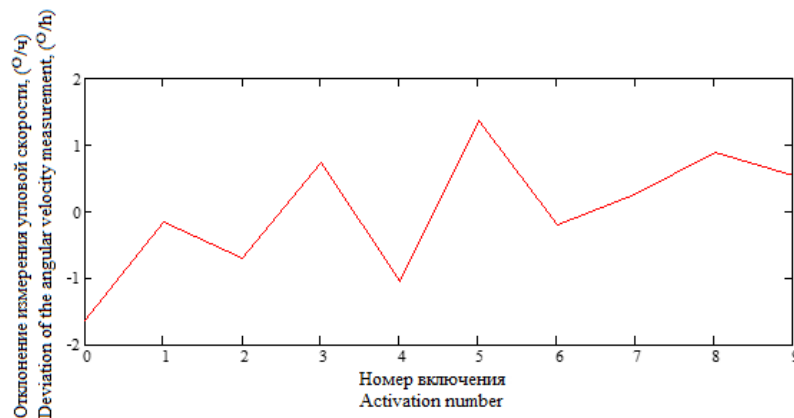


Рис. 9. Результаты измерения сигнала ВОГ № 3 с рабочей длиной оптической волны 1,3 мкм
Источники: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 9. Measurement results of the FOG No. 3 signal with an optical wavelength of 1.3 microns
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

Полученные предварительные результаты испытаний с хорошим запасом подтверждают возможность обеспечения необходимого уровня погрешности нулевого сигнала по каналу ДУСов от запуска к запуску ($5^\circ/\text{ч}$).

3. Экспериментальные исследования выходной характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов при различной температуре для малогабаритного ИИБ

Целью исследования погрешности нулевого сигнала ВОГ при различной температуре было определение при предварительных экспериментальных исследованиях величины изменения нулевого сигнала ВОГ при различной рабочей температуре.

Исследование погрешности нулевого сигнала ВОГ при различной температуре проводилось в диапазоне температур от 0 до 50°C .

Исследование изменения нулевых сигналов волоконно-оптических гироскопов при различной температуре проводилось на двух волоконно-оптических гироскопах с рабочей длиной оптической волны $0,82\ \mu\text{м}$, имеющих величину постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,235\ \text{с}$. Для сравнения было проведено измерение нулевого сигнала другого ВОГ с рабочей длиной оптической волны $0,82\ \mu\text{м}$, имеющего величину постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,135\ \text{с}$.

Гироскопы находились на неподвижном основании внутри климатической камеры, их оси чувствительности были ориентированы вертикально вверх. Изменение температуры в климатической камере задавалось по линейной функции от 0 до 50°C в течение 4 ч. Измерение начиналось после выдерживания выключенных гироскопов при 0°C в течение 2 ч.

Обработка результатов измерений проводилась по следующему алгоритму [11–15]:

$$\varphi m_{\text{д.ср}} = \left(\sum \varphi m_{\text{д.}i} \right) / n; \quad (8)$$

$$\omega m_{\text{д}} = \varphi m_{\text{д.ср}} / \tau_{\text{изм}}; \quad (9)$$

$$D = D_x, D_y, D_z,$$

где $\varphi m_{\text{д.}i}$ — мгновенное значение приращения угла при m -м включении; $\varphi m_{\text{д.ср}}$ — среднее значение приращения угла за один замер; m — номер замера; $\omega m_{\text{д}}$ — среднее значение измеренной угловой скорости при i -м замере.

На рис. 10 и 11 представлены графики изменения выходных сигналов двух ВОГ с рабочей длиной оптической волны $0,82\ \mu\text{м}$ с постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,35\ \text{с}$ при различной температуре. На рис. 12 приведен график изменения выходного сигнала одного ВОГ с рабочей длиной оптической волны $1,3\ \mu\text{м}$ (с постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,71\ \text{с}$) при различной температуре.

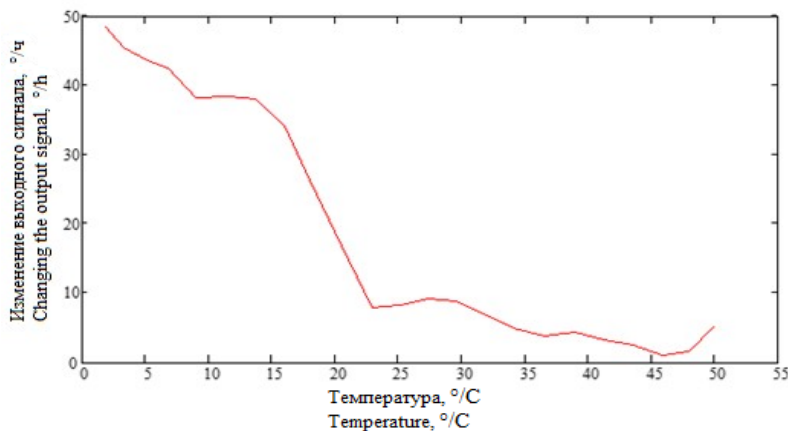


Рис. 10. Результаты измерения сигнала ВОГ № 1 с $T_{\text{вог}} \sim 0,235\ \text{с}$

Источник: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 10. Measurement results of the FOG signal No. 1 with $T_{\text{FOG}} \sim 0.235\ \text{s}$

Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

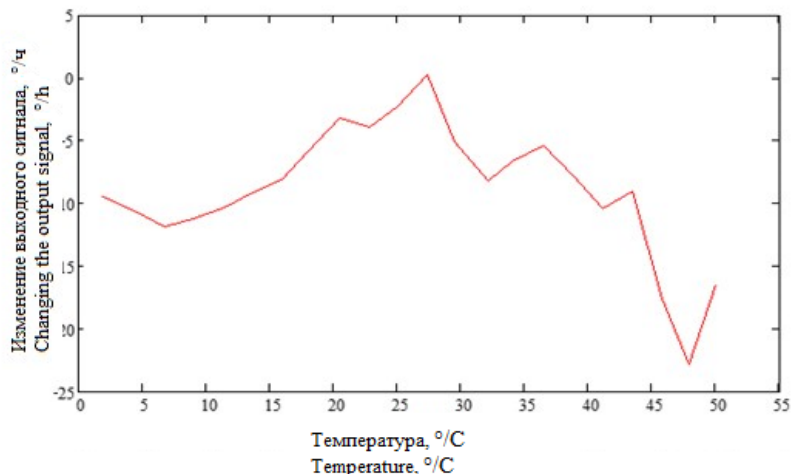


Рис. 11. Результаты измерения сигнала ВОГ № 2 с $T_{\text{вог}} \sim 0,235$ с

Источник: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 11. Measurement results of the FOG signal No. 2 with $T_{\text{FOG}} \sim 0.235$ s
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

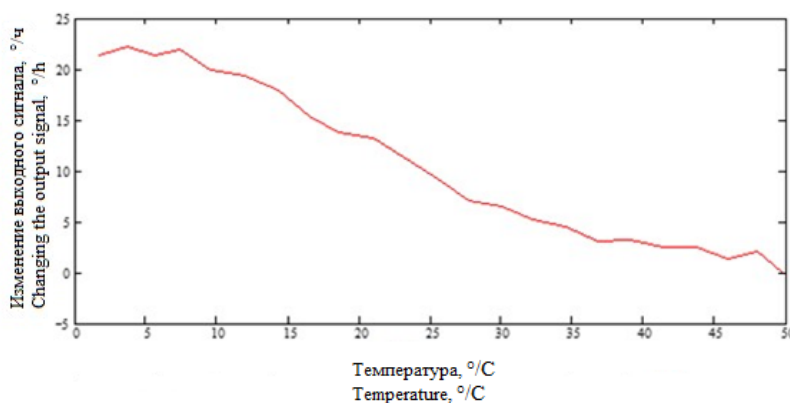


Рис. 12. Результаты измерения сигнала ВОГ № 3 с $T_{\text{вог}} \sim 0,135$ с

Источник: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 12. Measurement results of the FOG signal No. 3 with $T_{\text{FOG}} \sim 0.135$ s
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

Сравнение графиков показывает, что величины изменений сигналов близки по значениям, однако формы графиков имеют существенные отличия. В АО «НПО ИТ» имеется значительный опыт разработки аппроксимирующих функций для компенсации погрешности нулевого сигнала с уровнем погрешности компенсации $(0,5-1)^\circ/\text{ч}$.

Соответственно по результатам полученных экспериментальных данных можно спрогнозировать возможность разработки аппроксимирующих функций для компенсации погреш-

ности нулевого сигнала ВОГ для разрабатываемой ИИБ ($T_{\text{вог}} \sim 0,135$ с) с таким же уровнем погрешности компенсации.

Заключение

Авторами в результате проведенных исследований сделан ряд выводов.

1. Проведенные исследования волоконно-оптических гироскопов с рабочей длиной оптической волны 1,3 и 1,75 мкм подтвердили возможность их применения для малогабаритного инерциального измерительного блока, с учетом

технического задания, по следующим параметрам:

- диапазону измерения угловой скорости $\pm 300^\circ/\text{с}$;
- погрешности нулевого сигнала от запуска к запуску $< 1^\circ/\text{ч}$;
- изменению величины нулевого сигнала от температуры $< 0,5-1^\circ/\text{ч}$.

2. Спрогнозирована возможность разработки аппроксимирующих функций для компенсации погрешности нулевого сигнала ВОГ для разрабатываемой ИИБ ($T_{\text{вог}} \sim 0,135 \text{ с}$) с таким же уровнем погрешности компенсации.

3. Полученные результаты имеют сопоставимые характеристики с флагманами отечественного приборостроения волоконно-оптических гироскопов, таких как АО «Физоптика», ПАО «ПНППК», ООО НПК «Оптолинк» и АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», а по некоторым характеристикам опережают конкурентов (масса исследуемые ВОГ не более 50 г, отрицательный предел температурного диапазона составляет минус $60^\circ/\text{с}$, полностью отечественная электронная элементная база и материалы).

Проведенные исследования точностных характеристик волоконно-оптических гироскопов подтверждают возможность применения в составе разрабатываемого малогабаритного инерциального измерительного блока, а также имеют все основания применения в широчайшей сфере гражданской, военной и космической промышленности.

Список литературы

1. Салычев О.С. Прикладная инерциальная навигация: проблемы и решения. Москва : BMSTU press, 2004. 302 с. ISBN 5-7038-2395-1
2. Лукьянов Д.П., Распов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов. Санкт-Петербург : ЦНИИ «Электроприбор», 2021. 316 с. ISBN 978-5-91995-036-3
3. Гилев Д.Г. Оценка динамического диапазона датчика угловой скорости на основе волоконно-оптического резонатора // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10. № 1. С. 116–130. <https://doi.org/10.15593/2411-4375/2023.1.07> EDN: UIJWQS
4. Патюрель И., Онтас И., Лефевр Э., Наполитано Ф. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на основе ВОГ с уходом одна морская

миля в месяц: Мечта уже достижима? // Гироскопия и навигация. 2013. № 3 (82). С. 3–13. EDN: RCLGDP

5. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 28. № 2. С. 3–10. EDN: VDBYAV

6. Унтилов А.А., Егоров Д.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Нефросный С.Т., Азбелева М.П., Драницына Е.В. Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация 2017. Т. 25. № 3. С. 78–85. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2017.25.3.078-085> EDN: ZMJAJT

7. Драницына Е.В. Калибровка измерительного модуля прецизионной БИНС на волоконно-оптических гироскопах : дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2016. 89 с. EDN: ELTBLD

8. Ануцин О.Н. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / под общей ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. Изд. 2-е, перераб. и доп. Санкт-Петербург : ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 390 с. ISBN 5-900780-47-3 EDN: QNRBVL

9. Сирая Т.Н. Вариация Аллана как оценка погрешности измерения // Гироскопия и навигация. 2010. Т. 69. № 2. С. 29–36. EDN: NTPIRR

10. Deppe O., Dorner G., König S., Martin T., Voigt S., Zimmermann S. MEMS and FOG Technologies for Tactical and Navigation Grade Inertial Sensors — Recent Improvements and Comparison // Sensors. 2017. Vol. 17. No. 3. Article no. 567. <https://doi.org/10.3390/s17030567>

11. Beller J. OTDRs and backscatter measurements // Fiber Optic Test and Measurement / D. Derickson (Ed.). New Jersey : Prentice-Hall PTR, 1998. ISBN 0-13-534330-5

12. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope: Achievement and Perspective // Gyroscopy and Navigation. 2012. Vol. 3. P. 223–226. <https://doi.org/10.1134/S2075108712040062>

13. Удд Э. Волоконно-оптические датчики : вводный курс для инженеров и научных работников. Москва : Техносфера, 2008. 520 с. ISBN 978-5-94836-191-8

14. Markley F.L., Crassidis J.L. Fundamentals of spacecraft attitude determination and control : Space technology library. New York : Springer, 2014. Vol. 33. 486 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-0802-8> (accessed: 21.04.2025).

15. Моторин А.В. Идентификация моделей погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции методами нелинейной фильтрации : дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2023. 135 с.

References

1. Salychev OS. *Applied inertial navigation: problems and solutions*. Moscow: BMSTU Publ.; 2004. (In Russ.) ISBN 5-7038-2395-1.
2. Lukyanov DP, Raspopov VYa, Filatov YuV. *Applied theory of gyroscopes*. St. Petersburg: Concern Central

Research Institute Electropribor Publ.; 2021. (In Russ.) ISBN 978-5-91995-036-3

3. Gilev DG. Estimation of the dynamic range of the angular velocity sensor based on a fiber-optic resonator. *Applied Photonics*. 2023;10(1):116–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2411-4375/2023.1.07> EDN: UIJWQS

4. Paturel Y, Honthaas J, Lefevre H, Napolitano F. One nautical mile per month FOG based strapdown inertial navigation system: A dream already within reach? *Gyroscopy and Navigation*. 2013;3(82):3–13. (In Russ.) EDN: RCLGDP

5. Peshkhonov VG. The author of precision gyroscope. *Gyroscopy and Navigation*. 2020;11(2):188–192. <https://doi.org/10.1134/S2075108720020042> EDN: SQRNQO

6. Untilov AA, Egorov DA, Rupasov AV, Novikov RL, Neforosny ST, Azbeleva MP, Dranitsyna EV. Results of fiber-optic gyro testing. *Gyroscopy and Navigation*. 2017;25(3):78–85. (In Russ.) EDN: ZMJAJT

7. Dranitsyna EV. *Calibration of the measurement unit of a high-precision strapdown inertial navigation system using fiber-optic gyroscopes*. St Petersburg; 2016. (In Russ.) EDN: ELTBLD

8. Anuchin ON. *Integrated orientation and navigation systems for marine vehicles*. 2nd ed. St. Petersburg; Central Research Institute Electropribor Publ.; 2003. (In Russ.) ISBN 5-900780-47-3 EDN: QNRBVL

9. Siraya TN. Allan variation as an estimate of measurement error. *Gyroscopy and Navigation*. 2010;2:29–36. (In Russ.) EDN: NTPIRR

10. Deppe O, Dorner G, König S, Martin T, Voigt S, Zimmermann S. MEMS and FOG Technologies for Tactical and Navigation Grade Inertial Sensors — Recent Improvements and Comparison. *Sensors*. 2017;17(3):567. <https://doi.org/10.3390/s17030567>

11. Beller J. OTDR and backscatter measurements. *Fiber Optic Test and Measurement*. New Jersey: Prentice-Hall PTR; 1998. ISBN 0-13-534330-5

12. Lefevre HC. The fiber-optic gyroscope: Achievement and perspective. *Gyroscopy and Navigation*. 2012;3:223–226. <https://doi.org/10.1134/S2075108712040062>

13. Udd E. *Fiber-optic sensors*. Introductory course for engineers and researchers. Moscow: Technosphere Publ.; 2008. (In Russ.) ISBN 978-5-94836-191-8

14. Markley FL, Crassidis JL. *Fundamentals of spacecraft attitude determination and control*. New York: Springer Publ.; 2014. Part of the book series: Space Technology Library. Available from: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-0802-8> (accessed: 21.04.2025)

15. Motorin AV. *Identification of navigation sensor error models and aiding sources via nonlinear filtering*. St. Petersburg Publ.; 2023. (In Russ.)

Сведения об авторах

Орешкин Александр Владимирович, заместитель главного конструктора производства, Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники», Российская Федерация, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 2; eLIBRARY SPIN-код: 9804-7286, ORCID: 0009-0004-5981-0769; e-mail: oreshkins76@yandex.ru

Жульков Александр Сергеевич, начальник отдела, Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники», Российская Федерация, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 2; ORCID: 0009-0009-9954-1117; e-mail: 17082000.sg@gmail.ru

Сидоров Сергей Николаевич, главный специалист отдела, Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники», Российская Федерация, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 2; ORCID: 0009-0000-5826-7638; e-mail: sid_nik@mail.ru

Поленов Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Мытищинский филиал, Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1; eLIBRARY SPIN-код: 1191-7623; ORCID: 0000-0003-2227-5630; e-mail: Polenov@bmstu.ru

About the authors

Alexander V. Oreshkin, Deputy Chief Production Designer of the Joint-Stock Company Scientific and Production Association of Measuring Equipment, 2 Pionerskaya St, Korolev, Moscow Region, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9804-7286, ORCID: 0009-0004-5981-0769; e-mail: oreshkins76@yandex.ru

Alexander S. Zhulkov, Head of the Department of the Joint-Stock Company Scientific and Production Association of Measuring Equipment, 2 Pionerskaya St, Korolev, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-9954-1117; e-mail: 17082000.sg@gmail.ru

Sergey N. Sidorov, Chief Specialist of the Department of the Joint-Stock Company Scientific and Production Association of Measuring Equipment, 2 Pionerskaya St, Korolev, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-5826-7638; e-mail: sid_nik@mail.ru

Dmitry Yu. Polenov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 5 2-nd Baumanskaya, Moscow, 105005, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1191-7623; ORCID: 0000-0003-2227-5630; e-mail: Polenov@bmstu.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-93-108

EDN: HUSYOD

Научная статья / Research article

Снижение стоимости и повышение доступности резьбовых фиксаторов крепежных деталей без потери качества и надежности стопорения

К.Б. Дейнова^a✉, М.Ю. Малькова^a, М.В. Азанов^a,
А.Н. Задиранов^b, А.В. Азанов^a, Р.А. Сагадеев^c

^a Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^b Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Российская Федерация

^c Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация

✉ kristina.deinova@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 11 августа 2025 г.

Доработана: 3 ноября 2025 г.

Принята к публикации: 11 ноября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Цель исследования — сравнительный анализ и выбор отечественных аналогов универсального однокомпонентного анаэробного резьбового фиксатора средней прочности Loctite 243 (производства Германии). За критерий оценки принято обеспечение сопоставимого качества и надежности фиксации при минимизации конечной стоимости продукта. Объектами исследования стали герметики-аналоги следующих марок: ROSLOCK 243, AXIOM AS311, ADHESOL 534, EFELE 113, Гель Сантех-Мастер Синий, Анакрол 2032, RusBond A2.43. В ходе исследования при заданных времени полимеризации и средней прочности определены такие основные характеристики аналогов, как моменты отвинчивания и срыва. По результатам сравнительного анализа экспериментальных данных с паспортными значениями фиксаторов подтверждено соответствие заявленного производителями функционала фактическим характеристикам. В результате исследования выбраны оптимальные аналоги — EFELE 113 и ROSLOCK 243, позволяющие при предварительно регламентированных условиях эксперимента снизить конечную стоимость продукта ориентировочно в 8,2 и 9,5 раза соответственно. Использование выбранных аналогов способствует повышению стабильности и эффективности логистических процессов, упрощению поставок и снижению связанных с ними рисков, включая санкционные.

Ключевые слова: резьбовые соединения, фиксатор (герметик) резьб, момент страгивания (срыва), момент срезания (среза), момент отвинчивания, предел прочности, аксиальный сдвиг, сопрягаемые детали

Вклад авторов

Дейнова К.Б. — общая структура статьи, анализ и научная обработка полученных данных, визуализация, написание текста; Малькова М.Ю. — концепция исследования, научное руководство, анализ и научная обработка полученных данных, редактирование рукописи, валидация, утверждение окончательной версии; Азанов М.В. — общая структура статьи, проведение исследования, анализ и научная обработка полученных данных; Задиранов А.Н. — разработка концепции исследования, анализ и научная обработка полученных данных, редактирование рукописи, валидация, утверждение окончательной версии; Азанов А.В. — проведение исследования, анализ и научная обработка полученных данных; Сагадеев Р.А. — проведение исследования. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Дейнова К.Б., Малькова М.Ю., Азанов М.В., Задиранов А.Н., Азанов А.В., Сагадеев Р.А., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Для цитирования

Дейнова К.Б., Малькова М.Ю., Азанов М.В., Задиранов А.Н., Азанов А.В., Сагадеев Р.А. Снижение стоимости и повышение доступности резьбовых фиксаторов крепежных деталей без потери качества и надежности стопорения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 93–108. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-93-108> EDN: HUSYOD

Reducing the Cost and Improving the Availability of Thread-Locking Compounds Without Compromising Quality and Locking Reliability

Kristina B. Deynova^a✉, Marianne Yu. Malkova^a, Matvey V. Azanov^a,
Alexander N. Zadiranov^b, Alexey V. Azanov^a, Rustam A. Sagadeev^c

^a RUDN University, Moscow, Russian Federation

^b State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

^c South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russian Federation

✉ kristina.deinova@yandex.ru

Article history

Received: August 11, 2025.

Revised: November 2, 2025

Accepted: November 11, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The aim of this study is to conduct a comparative analysis and select domestic alternatives to the universal one-component, medium-strength anaerobic thread locker Loctite 243 (Germany). The evaluation criterion was to ensure comparable quality and reliability of locking performance while minimizing the final product cost. The objects of the study were the following alternative sealants: ROSLOCK 243, AXIOM AS311, ADHESOL 534, EFELE 113, SantekhMaster Blue Gel, Anakrol 2032, and RusBond A2.43. Under specified curing time and medium-strength conditions, key performance characteristics of the alternatives were determined, including breakaway torque and unscrewing torque. A comparative analysis of the experimental results against the manufacturers' technical specifications confirmed that the declared performance characteristics correspond to the actual functional properties. Based on the study results, EFELE 113 and ROSLOCK 243 were identified as the optimal alternatives. Under standardized experimental conditions, their use enables a reduction in the final product cost by approximately 8.2 and 9.5 times, respectively. The adoption of these alternatives enhances the stability and efficiency of logistics processes, simplifies supply chains, and reduces associated risks, including those related to sanctions.

Keywords: threaded connections, thread locker (sealant, fixator), breakaway torque, shearing torque, unscrewing torque, ultimate strength, axial shear, mating parts

Authors' contribution

Deynova K.B. — development of the overall manuscript structure, data analysis and interpretation, visualization, and manuscript preparation; *Malkova M.Yu.* — research conceptualization, scientific supervision, data analysis and interpretation, manuscript editing, validation, and approval of the final version; *Azanov M.V.* — development of the general structure of the article, conducting research, analysis and scientific processing of the obtained data; *Zadiranov A.N.* — development of the research concept, analysis and scientific processing of the obtained data, editing of the manuscript, validation, approval of the final version; *Azanov A.V.* — conducting research, analysis and scientific processing of the obtained data; *Sagadeev R.A.* — conducting research. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Deynova KB, Malkova MYu, Azanov MV, Zadiranov AN, Azanov AV, Sagadeev RA. Reducing the cost and improving the availability of thread-locking compounds without compromising quality and locking reliability. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):93–108. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-93-108> EDN: HUSYOD

Введение

В современном машиностроении резьбовое соединение является одним из основных методов создания надежных многоразовых разъемных узлов, объединяющих два или более изделий. Простота реализации этого метода заключается в использовании наружной резьбы на одной детали и внутренней на другой.

Наиболее распространенными вариантами резьбовых соединений¹ (рис. 1) являются пары: «деталь — деталь»; «деталь — резьбовая крепежная деталь (болт, винт, гайка, шпилька и т.д.)»; «резьбовая крепежная деталь — резьбовая крепежная деталь» [1].

Основной проблемой резьбовых соединений является снижение их надежности вследствие самооткручивания под воздействием нагрузок [2–4], таких как ударные, возникающие при неправильной эксплуатации изделий, а также вибраций. Кроме того, снижение усилия затяжки соединений может происходить из-за проскальзывания и проседания, что приводит к ослаблению узла или детали. Стопорные резьбовые соединения² [5; 6], направленное на предотвращение их самоотвинчивания под воздействием внешних факторов, включает механические способы и использование специальных составов.

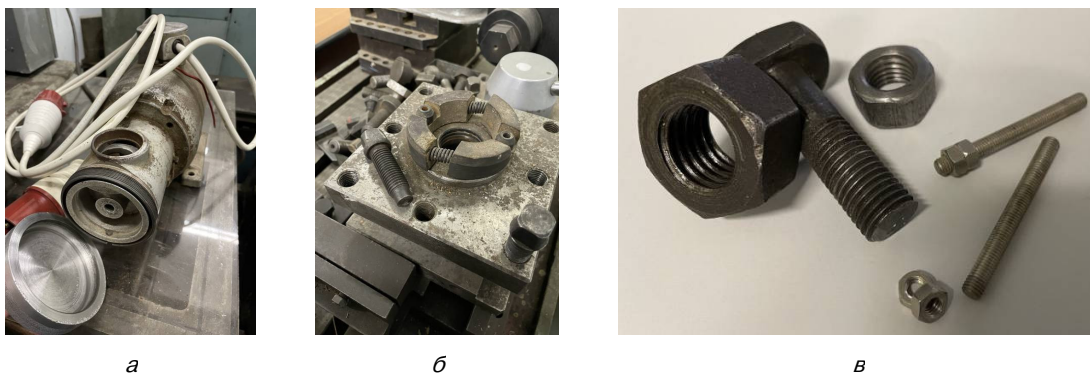


Рис. 1. Резьбовые соединения:
а — «деталь — деталь» (дробилка); *б* — «деталь — резьбовая крепежная деталь» (резцедержатель);
в — «резьбовая крепежная деталь — резьбовая крепежная деталь»

Источники: выполнено К.Б. Дейновой

Figure 1. Threaded connections:
a — “part — part” (crusher); *b* — “part — threaded fastener” (tool holder);
v — “threaded fastener — threaded fastener”

Source: by K.B. Deynova.

Механические способы стопорения:

1. Стопорная пружинная шайба (гровер): при закручивании гайки под нее устанавливается виток пружины, создающий пружинящий эффект и препятствующий самоотвинчиванию.

Этот метод эффективен для предотвращения самоотвинчивания только одного из элементов зацепления (болта или гайки).

2. Гайка с зубчатым фланцем: конструкция гайки с зубчатым фланцем обеспечивает увели-

¹ Яковлев А.Б., Пономаренко Е.А., Ермолаев А.В. Резьбовые соединения : учебное пособие. СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2015. 53 с.; Амирджанова И.Ю., Живоглядова И.А. Резьбовые соединения : учебно-методическое пособие. Тольятти : ТГУ, 2013. 79 с.

² Стопорение резьбовых соединений. URL: <https://www.rus-bolt.ru/articles/300/11441/> (дата обращения: 01.06.2025); ГОСТ Р 70116-2022. Соединения резьбовые. Типы стопорения : национальный стандарт РФ : дата введения 2023-01-01 / Росстандарт. Изд. официальное. Москва : РИС, 2022. 20 с.; Глазунов К.О., Степанов А.С., Тихонов-Бугров Д.Е., Шварцов В.В. Изображение стопорения резьбовых соединений : учебное пособие. СПб. : БГТУ «Военмех», 2012. 28 с.

чение площади контакта и создание пружинящего эффекта, что способствует удержанию резьбового соединения от самоотвинчивания.

3. *Самоконтрящаяся гайка с нейлоновым кольцом*: нейлоновое кольцо, встроенное в конструкцию гайки, тормозит ход завинчивания и снижает механические колебания, обеспечивая надежную фиксацию резьбового соединения.

4. *Стопорение проволокой*: стальная проволока, установленная в отверстие в винте или гайке, жестко фиксируется к другой детали, что предотвращает взаимное перемещение резьбовых элементов.

5. *Корончатая гайка со шплинтом*: металлический шплинт, продеваемый через резьбу и фиксируемый между зубьями корончатой гайки, блокирует возможность самоотвинчивания. Этот метод эффективен для предотвращения самоотвинчивания только одного из элементов зацепления (болта или гайки).

6. *Фрикционные приспособления* повышают упругость соединения и силу трения, но не обеспечивают постоянной фиксации при динамических нагрузках.

7. *Фиксирующие приспособления* включают болты, гайки, шайбы с рифлеными и зубчатыми поверхностями, которые предотвращают самоотвинчивание, но имеют высокую стоимость, занимают значительную площадь на поверхности детали и могут повреждать ее.

Использование специальных составов:

1) анаэробные герметики [7–10] наносятся на резьбовую поверхность крепежных деталей, в процессе сборки заполняют зазоры и затвердевают при отсутствии доступа кислорода, создавая надежное соединение, предотвращающее возможность откручивания винта без приложения значительного усилия;

2) резьбовые фиксаторы обеспечивают сцепление шероховатостей граничных резьбовых плоскостей, предотвращая любые перемещения под воздействием вибрационных нагрузок [11].

Второй из рассмотренных способов получил более широкое распространение благодаря своей простоте и доступности. Это связано с его высокой эффективностью и комплексным характером преимуществ.

Одним из ведущих мировых производителей инновационных клеевых составов и герметиков является фирма Loctite (Henkel, Германия). Компания предлагает эффективные решения для фиксации деталей из различных металлических сплавов, включая сталь, алюминий, латунь и др. Продукция компании представлена однокомпонентными жидкими и полутвердыми составами с низкой вязкостью, которые полимеризуются в безвоздушной среде при комнатной температуре с образованием твердой терморезактивной пластмассы, заполняющей зазоры между резьбовыми частями соединений. Преимуществом продукции Loctite является простота и удобство нанесения, что обеспечивает высокую адгезию и надежность соединений. Однако, поскольку Loctite является зарубежным брендом, стоимость продукции может значительно отличаться от отечественных аналогов. В некоторых случаях разница в цене может достигать 5–15 раз из-за параллельного импорта через «третьи» страны.

Ассортимент продукции Loctite классифицируется в зависимости от требуемой прочности и вязкости на несколько категорий, каждая из которых предназначена для определенного способа демонтажа:

1) низкая прочность — демонтаж осуществляется ручным инструментом;

2) средняя прочность — демонтаж требует значительного усилия и использования ручного инструмента;

3) высокая прочность — демонтаж возможен только с использованием ручного инструмента и местного нагрева, применяется для неразборных соединений;

4) капиллярные — аналогичные предыдущему типу, но нанесение осуществляется после соединения узла;

5) нежидкие (полутвердые) фиксаторы средней и высокой прочности — представлены в виде клеящих карандашей.

Основным преимуществом резьбовых фиксаторов Loctite является их способность предотвращать самоотвинчивание резьбовых соединений всех типов. Это достигается за счет пре-

дотвращения фреттинг-коррозии⁴ — процесса, при котором циклическое нагружение в зоне контакта сопряженных деталей приводит к потере эксплуатационных характеристик металла и его усталостному разрушению [12; 13].

Кроме того, резьбовые фиксаторы Loctite заполняют зазоры между поверхностями резьб, обеспечивая адгезию сопрягаемых изделий. Это позволяет уплотнить резьбовые соединения и создать сквозные резьбовые отверстия.

Одним из популярных продуктов Loctite является Loctite 243 — универсальный однокомпонентный анаэробный резьбовой фиксатор средней прочности. Продукт характеризуется широким спектром совместимости с металлическими поверхностями, включая пассивные материалы, такие как нержавеющая сталь, алюминий и оцинкованные поверхности. Loctite 243 устойчив к присутствию загрязнителей на

поверхности, таких как смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), моторные масла и консервационные смазки.

Фиксатор предотвращает ослабление резьбовых соединений в условиях вибрации [14], что делает его незаменимым для использования в таких устройствах, как насосы, двигатели, редукторы, прессы, компрессоры, а также для монтажных болтов и коробок передач. Благодаря своим свойствам Loctite 243 допускает возможность периодической разборки резьбовых соединений с помощью ручного инструмента. Характеристики Loctite 243⁵ представлены в табл. 1.

Прочность резьбового соединения [15–17] оценивается такими параметрами, как момент срезания резьбы и момент отвинчивания ($M_{отв}$). Момент срезания характеризует прочность резьбы на срез.

Таблица 1. Технические характеристики фиксатора Loctite 243

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Предварительная сборка узла	Нет	Агрегатное состояние	Жидкость
Проникающая способность, прочность	Средняя	Химическая основа	Метакрилат
Максимальный диаметр резьбы	M36	Вязкость, МПа*с	1300–3000
Время полимеризации (t_p), ч	2	Рабочая температура, °C	от –55 до +180
Объем упаковки, мл	10, 50, 250	Ручная прочность, мин: <ul style="list-style-type: none"> ■ сталь ■ латунь ■ нержавеющая сталь 	10 5 10
Тиксотропность	Есть		
Момент отворачивания, болт M10, Н*м	26		

Источники: выполнено А.В. Азановым.

Table 1. Technical characteristics of the Loctite 243 retainer

Parameter	Value	Parameter	Value
Pre-assembly of the unit	No	Aggregate state	Liquid
Penetration ability, strength	Average	Chemical basis	Methacrylate
Maximum thread diameter	M36	Viscosity, mPa*s	1300–3000
Hardening time, h	2	Operating temperature, °C	from –55 to +180
Packaging volume, ml	10, 50, 250	Hand strength, min: <ul style="list-style-type: none"> ■ steel ■ brass ■ stainless steel 	10 5 10
Thixotropy	yes		
Loosening torque, bolt M10, N*m	26		

Source: by A.V. Azanov

⁴ Иваночкин П.Г., Колесников И.В., Челохьян А.В. Изнашивание неподвижных соединений (фреттинг-коррозия) : учебное пособие. Ростов н/Д : РГУПС, 2001. 28 с.

⁵ Фиксация резьбовых соединений. URL: <https://vita.ru/wp-content/uploads/2019/07/loctite-1.pdf?ysclid=masajd2b2r905575563> (дата обращения: 01.06.2025); Loctite-henkel. URL: <https://www.loctite-henkel.ru/> (дата обращения: 01.06.2025); Loctite 243. URL: https://interoil-spb.ru/wp-content/uploads/2020/12/loctite_243.pdf (дата обращения: 01.06.2025).

При превышении внутренних напряжений предела прочности (σ_b) на разрыв, когда крутящий момент (\vec{M}) превышает силу трения ($F_{тр}$) и расчетную прочность изделия, происходит срыв резьбы и разделение стержня. Момент срезания представляет собой критическую величину, при достижении которой резьбовое соединение разрушается под действием внешней силы, вызывающей сдвиг соединяемых деталей перпендикулярно оси болта. Это приводит к деформации и нарушению целостности резьбовых изделий.

Проверка $M_{отв}$ учитывает специфику работы винтовой пары, где при отвинчивании окружная сила и $F_{тр}$ меняют направление на противоположное. В отличие от момента затяжки $M_{отв}$ требует значительно большего крутящего момента (примерно в 1,5 раза), что обусловлено процессами коррозии и диффузии материалов в зоне резьбового соединения.

Момент отвинчивания $M_{отв}$ возникает при достижении предела прочности на сдвиг (σ_s) при аксиальном нагружении, или момента срыва ($M_{ср}$) [14]. $M_{ср}$ представляет собой минимальный момент, необходимый для преодоления силы фиксации резьбы и начала процесса откручивания⁶. Этот момент также называют начальным моментом страгивания. Момент отвинчивания ($M_{отв}$) — это момент преодоления силы трения ($F_{тр}$), позволяющий открутить резьбовое соединение без его повреждения. Однако из-за эффекта статического трения момент страгивания ($M_{ср}$) превышает момент вращения, необходимый для начала движения резьбового соединения.

Применение фиксатора резьбы позволяет повысить следующие параметры:

1. σ_b при аксиальном сдвиге и, как следствие, $M_{ср}$. Герметизирующие составы усложняют осевое смещение резьбы, что приводит к увеличению данных показателей;

2. $M_{отв}$ — это связано с тем, что достижение σ_b при аксиальном сдвиге является начальным этапом увеличения $M_{отв}$.

3. Момент срезания. Фиксатор резьбы обеспечивает стабильность резьбового соединения как при срезании, так и при отвинчивании, независимо от направления вращения. Это особенно важно для соединений, подверженных разнонаправленным нагрузкам, например в резьбовых соединениях вала электродвигателя заточного станка и крепежного элемента (болта или гайки), которые прижимают абразивный круг к валу. При использовании герметика Loctite 243 формируется неразъемное резьбовое соединение. В случае превышения допустимого усилия вращения, независимо от его направления, происходит срыв резьбы, что может привести к повреждению сопрягаемых деталей.

В рамках данного исследования проведен подбор аналогов резьбового фиксатора Loctite 243. В табл. 1 представлены характеристики различных герметиков. При выборе объектов исследования руководствовались практической направленностью работы. При этом основная задача заключалась в подборе такого аналога, который по характеристикам будет максимально приближен к Loctite 243, а также позволит значительно снизить стоимость продукта.

Актуальность исследования объяснима низкой доступностью и высокой стоимостью товара на отечественном рынке. Проведенное исследование направлено на поиск альтернативных решений для обеспечения потребностей рынка в резьбовых фиксаторах, которые бы соответствовали высоким стандартам качества, но при этом имели более доступную цену.

Цель исследования — экспериментальная проверка и сравнительный анализ характеристик анаэробных фиксаторов резьбовых соединений средней прочности с определением оптимального отечественного аналога герметика Loctite 243, обеспечивающего сопоставимое качество и надежность фиксации при снижении конечной стоимости.

2. Материалы и методы

Экспериментальные исследования были направлены на проверку стандартных характеристик фиксаторов резьбовых соединений, ука-

⁶ Метод приложения крутящего момента. URL: <https://smetiz.ru/tekhnicheskaya-informaciya/rezbovyie-soedineniya/metod-prilozheniya-krutyashchego-momenta/> (дата обращения: 01.06.2025).

занных в технической документации, таких как предел прочности σ_b при аксиальном сдвиге ($M_{ср}$) и $M_{отв}$.

Исследование проводилось в несколько этапов:

1) составление перечня потенциальных аналогов Loctite 243, соответствующих заданным критериям;

2) закупка образцов для проведения испытаний;

3) разработка плана сравнения фиксатора Loctite 243 с выбранными аналогами, включая подбор критериев и характеристик;

4) проведение экспериментальных исследований;

5) анализ результатов и определение наиболее подходящих заменителей Loctite 243 с учетом установленных критериев.

Критерии отбора потенциальных аналогов включают:

- производство на территории Российской Федерации;

- наличие удовлетворительной логистической доступности (стабильность (нет риска применения санкций и наличие товара), снижение сроков поставок (повышение уровня логис-

тики), возможность приобретения через отечественных дилеров);

- сходство основных характеристик, таких как средняя прочность, t_p , $M_{ср}$ и $M_{отв}$;

- снижение стоимости по сравнению с Loctite 243 не менее, чем в два раза.

В табл. 2 представлен перечень аналогов Loctite 243, отобранных в соответствии с указанными критериями.

Используемое оборудование и средства измерения (СИ) (рис. 2):

1) динамометрический ключ электронный 3/8", 6–30 Н×м, тип NTE12-030RR с поверкой, NORGAU 051130032/П; диапазон измерения — 1,5–30 Н×м, дискретность — 0,01 Н×м, минимальное усилие — 6 Н×м и максимальное усилие — 30 Н×м;

2) динамометрический ключ электронный 3/8", 12–60 Н×м, тип NTE12-060RR, NORGAU 051130061; диапазон измерения — 3–60 Нм, дискретность — 0,01 Н×м, минимальное усилие — 12 Н×м и максимальное усилие — 60 Н×м;

3. Климатическая камера холод — тепло — влага КХТВ-250; температурный диапазон от –75 до +150 °С, диапазон относительной влажности от 20 до 98 % при температуре от +20 до +90 °С, дискретность — 0,1 °С.

Таблица 2. Перечень подобранных аналогов Loctite 243 и их стоимость

№	Аналог	Стоимость, руб.	№	Аналог	Стоимость, руб.
1	ROSLOCK 243	1100 / 1500	5	Гель СантехМастер Синий*	260 / 833
2	AXIOM AS311	1400 / 1260			
3	ADHESOL 534	2190 / 2214	6	Анакрол 2032	852 / 1457
4	EFELE 113	1678 / 1737	7	RusBond A2.43	1650 / 1138

*1 Закуплен вне плана (60 мл), так как применяется в основном в сантехнических соединениях (более универсальное решение: позволяет достичь герметичности).
Стоимость (50 мл) актуальна на май 2024 г. / май 2025 г. (OZON маркетплейс. URL: <https://www.ozon.ru/> (дата обращения: 01.06.2025)).
Стоимость Loctite 243 — 14300 руб. (2024 г.) / 3541 руб. (2025 г.).

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Азановым

Table 2. List of selected alternatives to Loctite243 and their cost

No.	Alternative	Cost, rub.	№	Alternative	Cost, rub.
1	ROSLOCK 243	1100 / 1500	5	Gel SantekhMaster Blue*	260 / 833
2	AXIOM AS311	1400 / 1260			
3	ADHESOL 534	2190 / 2214	6	Anacrol 2032	852 / 1457
4	EFELE 113	1678 / 1737	7	RusBond A2.43	1650 / 1138

*1 Purchased outside the plan (60 ml), as it is mainly used in plumbing connections (a more universal solution: allows achieving tightness).
The cost (50 ml) is valid for May 2024 / May 2025. (OZON marketplace. Available from: <https://www.ozon.ru/> (accessed: 01.06.2025)).
The cost of Loctite 243 is 14.300 rubles (2024) / 3.541 rubles (2025).

S o u r c e: by A.V. Azanov.



Рис. 2. Используемое оборудование и СИ*:

a — динамометрический ключ электронный 3/8", 6–30 Н*м; *б* — камера холод-тепло-влаги КХТВ-250; *в* — климатограмма
Источники: выполнено К.Б. Дейновой

Figure 2. Equipment and MI used*:

a — Electronic torque wrench 3/8", 6–30 N*m; *б* — Cold-heat-humidity chamber KHTV-250; *в* — climatoграм
Source: by K.B. Deynova.

* Электронный динамометрический ключ NORGAU NTE12-030RR 3/8" 6–30 Нм. URL: <https://www.vseinstrumenti.ru/product/elektronnyj-dinamometricheskij-klyuch-norgau-3-8-6-30-nm-s-poverkoj-051130032-p-1098306/> (дата обращения: 01.06.2025);
Электронный динамометрический ключ NORGAU NTE12-060RR 3/8" 12–60 Нм. URL: <https://www.vseinstrumenti.ru/product/elektronnyj-dinamometricheskij-klyuch-norgau-3-8-12-60-nm-051130061-984218/> (дата обращения: 01.06.2025);
Камера холод-тепло-влаги КХТВ-250. URL: <https://n-volga.ru/catalog/kamery-kholod-teplo-vlaga/khtv-250/> (дата обращения: 01.06.2025).

3. Климатическая камера холод — тепло — влага КХТВ-250; температурный диапазон от –75 до +150 °С, диапазон относительной влажности от 20 до 98 % при температуре от +20 до +90 °С, дискретность — 0,1 °С.

В соответствии с международным стандартом ISO 10964, при испытании фиксатора Loctite 243 наносят на резьбовые изделия Болт-гайка М10х15-6g/6H из стали марки 30 ГОСТ 1050. Испытания проводятся при температуре окружающей среды в диапазоне от 18 до 25 °С.

Для исследования выбрано изделие с цинковым покрытием, что способствует повышению коррозионной стойкости. Для получения достоверных результатов и минимизации погрешности измерений испытания проводились на трех образцах, к которым предъявлялись следующие требования:

- 1) тип резьбы: М10 с зазором до 0,3 мм (гайка — 7H, болт — 6g);
- 2) покрытие: цинковое.

В паспорте на резьбовое соединение указано $M_{ср}$ без предварительного натяга, равное 26 Н×м. Однако в результате эксперимента значения крутящего момента оказались в два раза

меньше в связи с использованием цинкового покрытия.

Первый этап эксперимента включал нанесение фиксатора на резьбовые соединения. Для аппроксимации значений использовали 9 пар «винт-гайка» для каждого образца герметика. После нанесения фиксатора образцы выдерживали при комнатной температуре в течение 24 ч для достижения полной полимеризации герметика [18–20]. Соединение резьбовой пары осуществлялось вручную без использования инструмента и без натяга.

На втором этапе эксперимента проводили измерение $M_{ср}$ и $M_{отв}$ с использованием электронного динамометрического ключа 3/8" с диапазоном измерений 6–30 Н×м при различных температурных условиях. В связи со значительным разбросом значений измерений при превышении диапазона гарантированной точности динамометрического ключа его заменяли на модель с диапазоном 12–60 Н×м. Температурные условия испытаний составляли –30 °С, 23 ± 2 °С, 150 °С. Выбор данных условий был обусловлен необходимостью оценки надежности резьбового соединения при нормальных и

граничных климатических условиях. Для создания заданных температурных режимов образцы помещали в климатическую камеру КХТВ-250, предназначенную для моделирования условий холод — тепло — влага. Основной задачей эксперимента было определение способности резьбового соединения, обработанного фиксатором, сохранять свои функциональные характеристики и надежность при различных климатических условиях. Схема эксперимента представлена на рис. 3.

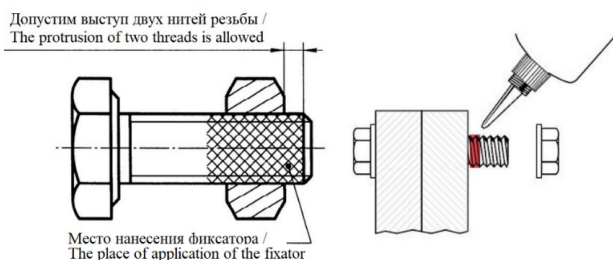


Рис. 3. Схема эксперимента*
Источники: выполнено К.Б. Дейновой.

Figure 3. Experimental scheme*
Source: by K.B. Deynova.

* ISO-10964-1993. Adhesives — Determination of torque strength of anaerobic adhesives on threaded fasteners.
URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/18936/878f6a506e7841c18cea43c7f5a99cac/ISO-10964-1993.pdf>
(дата обращения: 01.06.2025); Нанесение резьбовых фиксаторов Loctite.
URL: https://loctite.gluesale.ru/support/infliction/infliction_threadlocking/ (дата обращения: 01.06.2025).

3. Результаты и обсуждение

Для исследования специфики потери свойств фиксатором Loctite 243 и оценки корректности экспериментальных условий были созданы аномальные условия (табл. 3, 4).

В качестве объекта исследования использовался образец с истекшим сроком годности (до 2023 г.), а t_p составило 24 ч вместо требуемых 7 дней (по паспорту). В результате $M_{ср}$ оказалась примерно в два раза ниже паспортного значения.

Учитывая стабильность t_p и условий эксперимента, проведено сравнение средних данных с паспортными характеристиками (табл. 4, рис. 3, 4).

При математической обработке экспериментальных данных были выбраны аналоги, наиболее близкие к оригиналу (рис. 4). Сравнение с паспортными данными (рис. 5) показало, что фактическая прочность фиксаторов находится в пределах средней прочности. Отмечаем, что на момент проведения исследования для образцов № 7 и № 8 затруднен процесс логистики (задержка поставки), что не отвечает выдвинутым требованиям задачи. Среди аналогов были выбраны EFELE 113 (№ 5) и ROSLOCK 243 (№ 2).

Таблица 3. Результаты экспериментов (тест на откручивание при заданной температуре)

№	Температура, °С	-30		+22		+150	
	Фиксатор / Результаты, Н×м	$M_{ср}$	$M_{отв}$	$M_{ср}$	$M_{отв}$	$M_{ср}$	$M_{отв}$
1	LOCTITE 243	6,40	4,95	10,10	3,75	6,47	2,45
		5,45	3,80	10,80	3,75	6,25	3,29
		8,70	4,60	12,90	4,20	8,54	2,49
	Среднее значение, Н×м	6,85	4,45	11,27	3,90	7,09	2,74
2	ROSLOCK 243	16,10	6,00	16,40	4,95	3,68	2,40
		9,20	3,65	19,00	6,05	3,70	2,64
		17,00	4,45	16,60	3,95	4,53	2,30
	Среднее значение, Н×м	14,10	4,70	17,33	4,98	3,97	2,44
3	AXIOM AS311	21,20	18,50	29,10	21,50	9,05	7,91
		30,00	19,50	30,60	27,50	8,17	6,75
		30,00	23,50	30,00	23,50	9,53	10,50
	Среднее значение, Н×м	27,07	20,50	29,90	24,17	8,92	8,39
4	ADHESOL 534	30,00	20,50	36,00	33,00	13,20	3,45
		30,00	29,50	40,00	31,00	14,60	6,85
		30,00	29,50	44,00	40,00	12,90	3,30
	Среднее значение, Н×м	30,00	26,50	40,00	34,67	13,57	4,53
5	EFELE 113	9,42	3,95	18,60	6,00	4,10	2,01
		18,00	5,80	18,30	6,60	4,75	2,20
		16,70	4,65	17,10	4,75	4,48	2,50
	Среднее значение, Н×м	14,71	4,80	18,00	5,78	4,44	2,24

№	Температура, °C	-30		+22		+150	
	Фиксатор / Результаты, Н×м	M_{cp}	$M_{отв}$	M_{cp}	$M_{отв}$	M_{cp}	$M_{отв}$
6	Гель СантехМастер Синий	17,80	10,60	10,80	5,40	4,90	4,33
		12,70	5,80	11,80	5,15	6,10	5,34
		13,52	7,60	10,60	4,60	5,10	4,10
	Среднее значение, Н×м	14,67	8,00	11,07	5,05	5,37	4,59
7	Анакрол 2032	21,30	6,85	15,50	3,90	3,40	2,45
		15,40	4,60	13,90	3,60	3,50	2,53
		13,00	6,15	13,60	3,50	3,40	2,35
	Среднее значение, Н×м	16,57	5,87	14,33	3,67	3,43	2,44
8	RusBond A2.43	30,00	29,50	34,00	27,00	16,10	9,25
		30,00	29,50	35,00	26,50	13,40	12,50
		30,00	29,50	33,00	27,00	9,10	6,85
	Среднее значение, Н×м	30,00	29,50	34,00	26,83	12,87	9,53

Примечание: M_{cp} — момент срагивания, срыва, Н*м; $M_{отв}$ — момент отвинчивания, вращения, Н*м

Источник: выполнено К.Б. Дейновой, А.В. Азановым.

Table 3. Experimental results (untwist test at a given temperature)

No.	Temperature, °C	-30		+22		+150	
	Fixative / Results, N×m	M_{br}	M_{uns}	M_{br}	M_{uns}	M_{br}	M_{uns}
1	LOCTITE 243	6.40	4.95	10.10	3.75	6.47	2.45
		5.45	3.80	10.80	3.75	6.25	3.29
		8.70	4.60	12.90	4.20	8.54	2.49
	Average value, N×m	6.85	4.45	11.27	3.90	7.09	2.74
2	ROSLOCK 243	16.10	6.00	16,40	4.95	3.68	2.40
		9.20	3.65	19,00	6.05	3.70	2.64
		17.00	4.45	16,60	3.95	4.53	2.30
	Average value, N×m	14.10	4.70	17,33	4.98	3.97	2.44
3	AXIOM AS311	21.20	18.50	29,10	21.50	9.05	7.91
		30.00	19.50	30,60	27.50	8.17	6.75
		30.00	23.50	30,00	23.50	9.53	10.50
	Average value, N×m	27.07	20.50	29,90	24.17	8.92	8.39
4	ADHESOL 534	30.00	20.50	36,00	33.00	13.20	3.45
		30.00	29.50	40,00	31.00	14.60	6.85
		30.00	29.50	44,00	40.00	12.90	3.30
	Average value, N×m	30.00	26.50	40,00	34.67	13.57	4.53
5	EFELE 113	9.42	3.95	18,60	6.00	4.10	2.01
		18.00	5.80	18,30	6.60	4.75	2.20
		16.70	4.65	17,10	4.75	4.48	2.50
	Average value, N×m	14.71	4.80	18,00	5.78	4.44	2.24
6	Gel SantekhMaster Blue	17.80	10.60	10,80	5.40	4.90	4.33
		12.70	5.80	11,80	5.15	6.10	5.34
		13.52	7.60	10,60	4.60	5.10	4.10
	Average value, N×m	14.67	8.00	11,07	5.05	5.37	4.59
7	Anacrol 2032	21.30	6.85	15,50	3.90	3.40	2.45
		15.40	4.60	13,90	3.60	3.50	2.53
		13.00	6.15	13,60	3.50	3.40	2.35
	Average value, N×m	16.57	5.87	14,33	3.67	3.43	2.44
8	RusBond A2.43	30.00	29.50	34,00	27.00	16.10	9.25
		30.00	29.50	35,00	26.50	13.40	12.50
		30.00	29.50	33,00	27.00	9.10	6.85
	Average value, N×m	30.00	29.50	34,00	26.83	12.87	9.53

Notes: M_{br} — breakaway torque, N*m; M_{uns} — unscrewing torque, rotation, N*m

Source: by K.B. Deynova, A.V. Azanov.

Таблица 4. Сравнение средних экспериментальных данных с паспортными значениями

№	Фиксатор / Температура, °С	–30	22	150	23*	$M_{cp} \leq M_{cp}^*$
Момент срыва $M_{cp}, H \times M$						
1	LOCTITE 243	6,85	11,27	7,09	26	+
2	ROSLOCK 243	14,10	17,33	3,97	15–25	+
3	AXIOM AS311	27,07	29,90	8,92	25 макс	–
4	ADHESOL 534	30,00	40,00	13,57	15	–
5	EFELE 113	14,71	18,00	4,44	8–25	+
6	Гель СантехМастер Синий	14,67	11,07	5,37	Отсутствует	±
7	Анакрол 2032	16,57	14,33	3,43	8–25	+
8	RusBond A2.43	30,00	34,00	12,87	15–25	–
Момент отвинчивания $M_{отв}, H \times M$						
1	LOCTITE 243	4,45	3,90	2,74	5	+
2	ROSLOCK 243	4,70	4,98	2,44	5–10	±
3	AXIOM AS311	20,50	24,17	8,39	Отсутствует	±
4	ADHESOL 534	26,50	34,67	4,53	6	–
5	EFELE 113	4,80	5,78	2,24	4–10	+
6	Гель СантехМастер Синий	8,00	5,05	4,59	Отсутствует	±
7	Анакрол 2032	5,87	3,67	2,44	4–10	±
8	RusBond A2.43	29,50	26,83	9,53	6–14	–

Примечание: (*) паспортные данные; $M_{cp} \leq M_{cp}^*$ — сравнение полученных при нормальной температуре значений с паспортными данными; (±) — из-за отсутствия паспортного значения однозначно оценить приемлемость полученного результата невозможно или полученное экспериментальное значение незначительно отличается от паспортных данных.

Источники: выполнено К.Б. Дейновой, М.В. Азановым.

Table 4. Comparison of average experimental data with rated values

No.	Fixative / Temperature, °C	–30	22	150	23*	$M_{br} \leq M_{uns}^*$
Breakaway torque $M_{br}, N \times m$						
1	LOCTITE 243	6.85	11.27	7.09	26	+
2	ROSLOCK 243	14.10	17.33	3.97	15–25	+
3	AXIOM AS311	27.07	29.90	8.92	25 max	–
4	ADHESOL 534	30.00	40.00	13.57	15	–
5	EFELE 113	14.71	18.00	4.44	8–25	+
6	Gel SantekhMaster Blue	14.67	11.07	5.37	Absent	±
7	Anacrol 2032	16.57	14.33	3.43	8–25	+
8	RusBond A2.43	30.00	34.00	12.87	15–25	–
Unscrewing torque $M_{uns}, N \times m$						
1	LOCTITE 243	4.45	3.90	2.74	5	+
2	ROSLOCK 243	4.70	4.98	2.44	5-10	±
3	AXIOM AS311	20.50	24.17	8.39	Absent	±
4	ADHESOL 534	26.50	34.67	4.53	6	–
5	EFELE 113	4.80	5.78	2.24	4–10	+
6	Gel SantekhMaster Blue	8.00	5.05	4.59	Absent	±
7	Anacrol 2032	5.87	3.67	2.44	4–10	±
8	RusBond A2.43	29.50	26.83	9.53	6–14	–

Notes: (*) — manufacturer details; $M_{br} \leq M_{uns}^*$ — comparison of values obtained at normal temperature with rated data; (±) — due to the absence of a rated value, it is impossible to unambiguously assess the acceptability of the obtained result, or the obtained experimental value differs slightly from the rated data.

Source: by K.B. Deynova, M.V. Azanov.

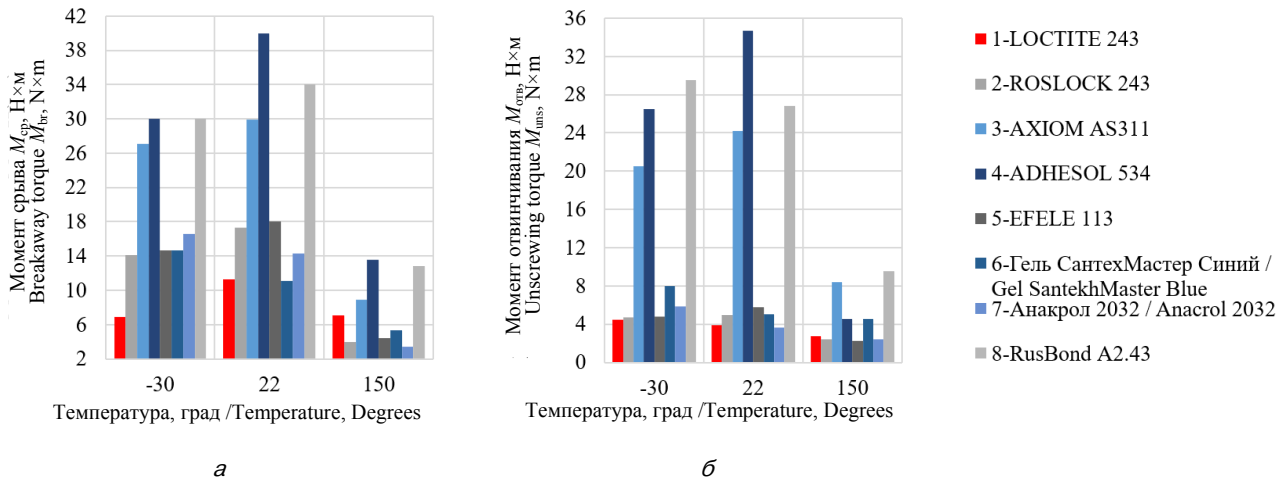


Рис. 4. Экспериментальная зависимость характеристик фиксаторов от температуры:
a — момент срыва $M_{бр}$, Н×м; *б* — момент отвинчивания $M_{отв}$, Н×м
 Источник: выполнено К.Б. Дейновой, М.В. Азановым

Figure 4. Experimental dependence of the characteristics of fixatives on temperature:
a — breakaway torque M_{br} , N×m; *б* — unscrewing moment M_{uns} , N×m
 Source: by K.B. Deynova, M.V. Azanov.

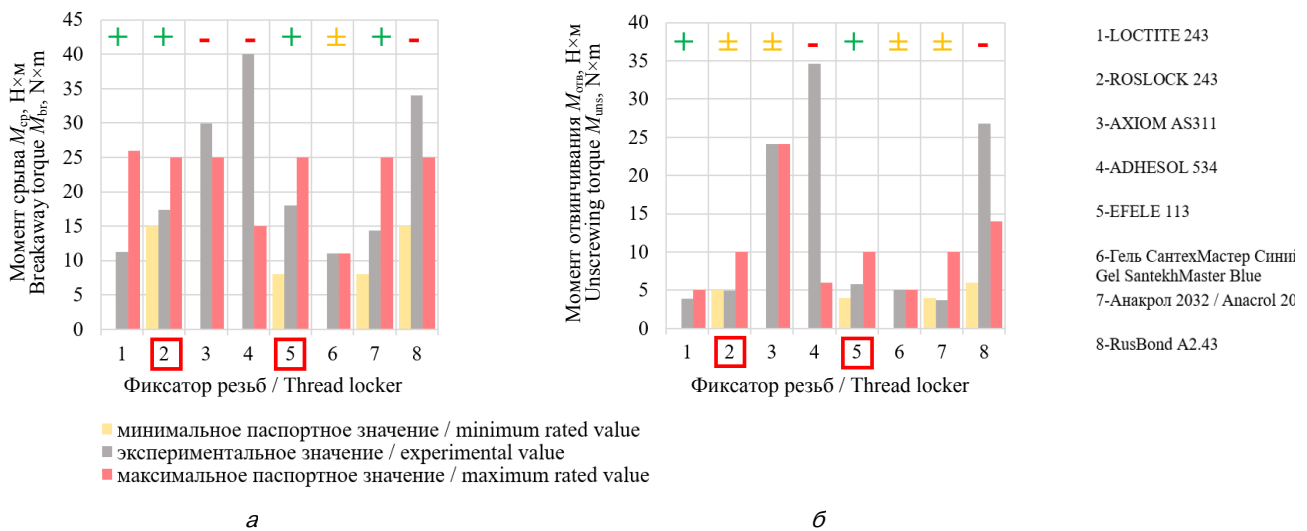


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных с паспортными значениями при нормальной температуре:
a — момент срыва $M_{бр}$, Н×м; *б* — момент отвинчивания $M_{отв}$, Н×м
 Источник: выполнено К.Б. Дейновой, М.В. Азановым

Figure 5. Comparison of experimental data with rated values at normal temperature:
a — breakaway torque M_{br} , N×m; *б* — unscrewing torque M_{uns} , N×m
 Source: by K.B. Deynova, M.V. Azanov.

Характеристики $M_{ср}$ при заданных температурах у выбранных аналогов оказались лучше, чем у других рассмотренных вариантов, и находились в пределах паспортных значений (15–25 Н×м). Это гарантирует надежность фиксации при эксплуатации, при этом данные фиксаторы относятся к средней прочности.

Сравнительный анализ характеристик подобранных аналогов показал, что ни один из них полностью не соответствует параметрам Loctite 243. Большинство аналогов демонстрируют более высокие показатели (рис. 6). Однако следует учитывать, что фиксатор-оригинал был протестирован в условиях, которые

могут быть охарактеризованы как аномальные по сравнению с условиями использования аналогов (см. описание выше). В частности, для образцов № 3 и № 4 зафиксированы значения, превышающие паспортные характеристики, что

указывает на их принадлежность к группе более прочных фиксаторов и не соответствует заявленной категории средней прочности, что являлось одним из основных требований поставленной задачи.

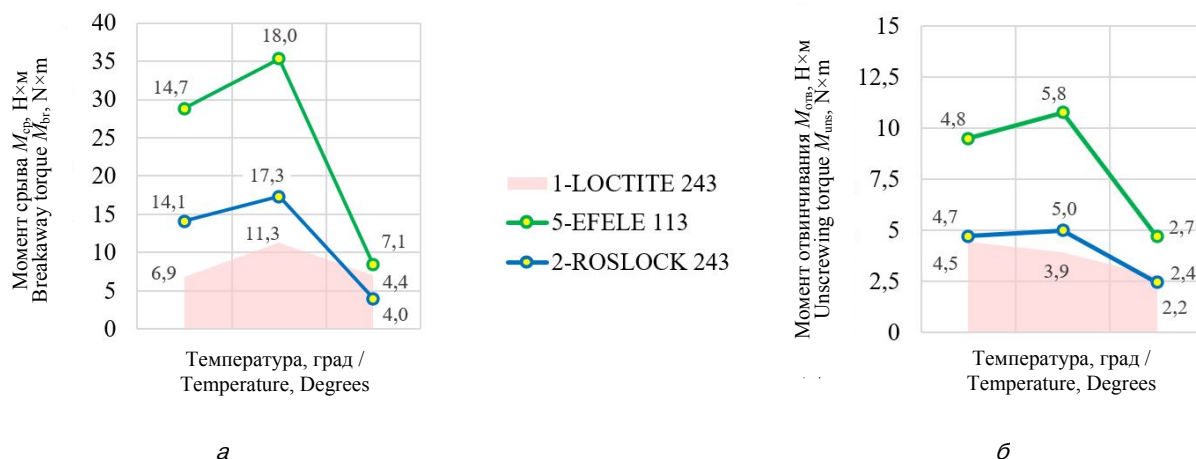


Рис. 6. Сравнение характеристик фиксаторов-аналогов с оригиналом: а — момент срыва $M_{бр}$, Н×м; б — момент отвинчивания $M_{отв}$, Н×м

И с т о ч н и к: выполнено К.Б. Дейновой, М.В. Азановым

Figure 6. Comparison of the characteristics of analog fixators with the original:

а — breakaway torque M_{br} , N×m; б — unscrewing torque M_{uns} , N×m

S o u r c e: by K.B. Deynova, M.V. Azanov.

Заклучение

В результате проведенного исследования подобраны отечественные аналоги универсального однокомпонентного анаэробного резьбового фиксатора средней прочности Loctite 243. Наилучшими из них оказались герметики марок EFELE 113 и ROSLOCK 243. Они обеспечивают сопоставимое качество фиксации и надежность при сохранении уровня фиксации в условиях, аналогичных экспериментальным.

Использование выбранных аналогов позволяет снизить стоимость продукции примерно в 8,2 и 9,5 раза по сравнению с Loctite 243. Это способствует повышению доступности (стабильности и уровня логистики), сокращению сроков поставок, а также снижению связанных с этим рисков, включая санкционные. Соотношение цены и качества продукции рассмотренных производителей является оптимальным. Выбранные фиксаторы-аналоги позволяют

достичь качества (обеспечение требуемой фиксации) и надежности (поддержание уровня фиксации с течением времени в рассматриваемых условиях).

Исследование имеет практическую направленность и основано на FMEA-анализе (Failure Mode and Effects Analysis), а также оценке робастности процесса внедрения и последующего использования аналогов на предприятиях машиностроительной отрасли. Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования, являются достоверными исключительно для конкретного случая и не могут служить шаблоном для выбора фиксаторов резьбовых соединений указанных марок.

Подобранные аналоги обладают индивидуальными преимуществами, которые позволяют им конкурировать с оригинальным продуктом. Однако для более объективной оценки рекомендуется проведение дополнительных исследований.

Список литературы

1. *Валиуллина А.А., Каратаев О.Р.* Исследование прочностных характеристик резьбовых соединений // Евразийский союз ученых. 2015. № 10–2 (19). С. 36–38. EDN: VBGXQH
2. *Суслов А.Г., Дальский А.М.* Научные основы технологии машиностроения. Москва : Машиностроение, 2002. 684 с. ISBN 5-217-03108-5
3. *Родионов Ю.В., Карпухин С.В., Суменков С.В.* Теоретическое обоснование безотказности резьбовых соединений автомобилей в процессе эксплуатации // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 3. С. 135–141. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2020-3-135> EDN: BEMOCL
4. *Лукаш И.Ю., Бахарев А.А.* Анализ причин и последствий неточной (неравномерной) затяжки резьбовых соединений машин // Наука и образование. Мичуринск, 2021. Т. 4. № 2. № ст. 31. EDN: XHLOOP
5. *Лукашук М.Д., Кабаков А.С., Лукашук А.Д.* Современные способы фиксации резьбового соединения // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта : сборник статей ВНИПК. Екатеринбург : УрФУ, 2020. С. 132–133. EDN: XHSUQD
6. *Осинов К.Н.* К вопросу оценки качества сборки резьбовых соединений в автоматизированном производстве // Автоматизация и измерения в машиностроении. 2018. № 1 (1). С. 23–29. EDN: YMHNXV
7. *Стерхов А.В.* Применение анаэробных герметиков: перспективы для арматуростроения // Арматуростроение. 2022. № 2 (137). С. 34–39. EDN: TMUIFK
8. *Кочетков Д.В., Воячек И.И., Зверовщиков А.Е.* Разработка и исследование функциональных моделей резьбовых соединений типа стяжки при сборке с анаэробными материалами // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 4 (20). С. 115–127. EDN: XKOMBJ
9. *Ли Р.И., Малюгин В.А.* Прочность анаэробных герметиков, наполненных металлическими наноразмерными частицами // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сборник научных трудов XIV МНПК. Курск : ЗАО «Университетская книга», 2019. С. 113–117. EDN: ZBBFLF
10. *Li R.I., Psarev D.N., Malyugin V.A.* Modification of anaerobic sealants by metal nanoparticles // *Polymer Science, Series D*. 2019. Vol. 12. P. 376–380. <https://doi.org/10.1134/S1995421219040075>
11. *Сухов А.В., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С.* Сборка резьбовых и клеерезьбовых соединений с наложением ультразвуковых колебаний // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2024. Т. 26. № 3. С. 6–23. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.3-6-23>
12. *Петухов А.Н.* К вопросу о механизме фреттинга и фреттинг-усталости в прессовых и малоподвижных соединениях деталей и узлов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения : труды МНТК. Самара : СГАУ, 2003. Ч. 2. С. 378–383. EDN: UYCZOT
13. *Малыгин В.И., Лобанов Н.В., Васильев А.В.* Фрикционные характеристики материалов резьбовых соединений сборных гребных винтов // Машиностроение и инженерное образование. 2013. № 3. С. 28–34. EDN: RTVUEN
14. *Курушин М.И., Курушин А.М.* Самоотвинчивание гаек при вибрационном нагружении резьбовых соединений // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Самара : СГАУ, 2003. Ч. 1. С. 278–286. EDN: URSOAP
15. *Конonenко А.С., Псарев Д.Н., Рожнов А.Б.* Стойкость к старению и вибрационным нагрузкам полимерного композиционного материала на основе анаэробного герметика «АН-111» // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. № 5 (93). С. 4–8. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-4-8>
16. *Ли Р.И., Рожнов А.Б., Хатунцев В.В.* Исследование деформационно-прочностных свойств полимерной нанокompозиции на основе анаэробного герметика АН-111 // Вестник МичГАУ. 2014. № 6. С. 43–46. EDN: TLMLFV
17. *Песин М.В., Субботин Д.А., Баева М.А., Федосеева А.И., Туранский Р.А., Шакиров Р.К., Григорьева А.В.* Пути решения проблемы разрушения резьбовых соединений нефтепромыслового и бурового оборудования // Экспозиция Нефть Газ. 2015. № 4. С. 18–20. EDN: UBGPBV
18. *Toirov I.J., Batirov Z.L., Razzakov T.* Physical and mechanical properties of anaerobic sealants // *E3S Web of Conf.*, V ISC “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO — 2023). 2023. Vol. 401. Article no. 03015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340103015>
19. *Stamper D.J.* Curing characteristics of anaerobic sealants and adhesive // *British Polymer Journal*. 1983. Vol. 15. No. 1. P. 34–39. <https://doi.org/10.1002/pi.4980150109>
20. *Черкасов В.Д., Бородин А.В.* Влияние технологических добавок на адгезионные свойства герметика // Строительство и реконструкция. 2025. № 3. С. 129–135. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-119-3-129-135> EDN: UTDGDV

References

1. Valiullina AA, Karataev OR. Study of strength characteristics of threaded connections. *Eurasian union of scientists*. 2015;10-2(19):36–38. (In Russ.) EDN: VBGXQH

2. Suslov AG, Dal'skiy AM. *Scientific foundations of mechanical engineering technology*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2002. (In Russ.) ISBN 5-217-03108-5
3. Rodionov YuV, Karpushin SV, Sumenkov SV. Theoretical justification for the reliability of threaded connections of cars during operation. *Intelligence. Innovations. Investments*. 2020;(3):135–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2020-3-135> EDN: BEMOCL
4. Lukash IYu, Bakharev AA. Analysis of the causes and consequences of inaccurate (irregular) tightening of threaded machines connections. *Science and education*. 2021;4(2);31. (In Russ.) EDN: XHLOOP
5. Lukashuk MD, Kabakov AS, Lukashuk AD. Modern methods of fixing threaded connections. *Innovative development of land transport equipment and technologies: a collection of articles of the All-Russian SPC*; 2019 Dec 06; Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University. 2020. p. 132–133. (In Russ.) EDN: XHSUQD
6. Osipov KN. To the question of assessing the quality of assembly of threaded connections in automated production. *Automation and Measurements in Mechanical Engineering*. 2018;1(1):23–29. (In Russ.) EDN: YMHXV
7. Sterkhov AV. Application of anaerobic sealants: prospects for valve engineering. *Valve Engineering*. 2022;2(137):34–39. (In Russ.) EDN: TMUIFK
8. Kochetkov DV, Voyachek II, Zverovshchikov AE. Development and research of functional models threaded connections type gathering in assembly anaerobic materials. *Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*. 2016;4(20):115–127. (In Russ.) EDN: XKOMBJ
9. Li RI, Malyugin VA. Strength of anaerobic sealants filled with metal nanoparticles. *Modern instrumental systems, information technologies and innovations*; 2019 Mar 13–14; Kursk. Universitetskaya kniga; Kursk; 2019. p. 113–117. (In Russ.) EDN: ZBBFLF
10. Li RI, Psarev DN, Malyugin VA. Modification of anaerobic sealants by metal nanoparticles. *Polymer Science, Series D*. 2019;12:376–380. <https://doi.org/10.1134/S1995421219040075>
11. Sukhov AV, Sundukov SK, Fatyukhin DS. Assembly of threaded and adhesive-threaded joints with the application of ultrasonic vibrations. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2024;26(3): 6–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.3-6-23>
12. Petukhov AN. On the mechanism of fretting and fretting fatigue in pressed and low-mobility joints of parts and units. *Problems and Prospects of Engine Engineering Development*; 2003 Jun 26–27; Samara. Samara; Samara National Research University; 2003. p. 378–383. (In Russ.) EDN: UYCZOT
13. Maligin VI, Lobanov NV, Vasiliev AV. Research on friction behavior of thread joint materials for built-up marine propellers. *Mechanical Engineering and Engineering Education*. 2013;3:28–34. (In Russ.) EDN: RTVUEN
14. Kurushin MI, Kurushin AM. Self-loosening of nuts under vibration loading of threaded connections. *Problems and Prospects of Engine Building Development*; 2003 Jun 26–27; Samara. Samara; Samara National Research University; 2003. p. 278–286. (In Russ.) EDN: URSOAP
15. Kononenko AS, Psarev DN, Rozhnov AB. Resistance to aging and vibration loads of a polymer composite material based on the anaerobic sealant “AH-111”. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education “Moscow State Agro-engineering University Named After V.P. Goryachkin”* 2019;5:4–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-4-8>
16. Li RI, Rozhnov AB, Khatuntsev VV. Research deformation-strength properties of polymeric nanocomposition on the basis of anaerobic hermetic AN-111. *Bulletin of MichSAU*. 2014;6:43–46. (In Russ.) EDN: TLMLFV
17. Pesin MV, Subbotin DA, Baeva MA, Fedoseeva AI, Turansky RA, Shakirov RK, Grigorieva AV. Solutions to the problem of the destruction of the threaded joints of artificial lift and drilling equipment. *Oil Gas Expo*. 2015;4:18–20. (In Russ.) EDN: UBGPPB
18. Toirov IJ, Batirov ZL, Razzakov T. Physical and mechanical properties of anaerobic sealants. *E3S Web of Conf., V ISC “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO — 2023)*. 2023;401:03015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340103015>
19. Stamper DJ. Curing characteristics of anaerobic sealants and adhesive. *British Polymer Journal*. 1983; 15(1):34–39. <https://doi.org/10.1002/pi.4980150109>
20. Cherkasov VD, Borodin AV. Influence of technological additives on the adhesive properties of sealant. *Building and Reconstruction*. 2025;(3):129–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-119-3-129-135>

Сведения об авторах

Дейнова Кристина Борисовна, аспирант базовой кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 2640-1910, ORCID: 0009-0002-1864-9564; e-mail: kristina.deinova@yandex.ru

Малькова Марианна Юрьевна, доктор технических наук, профессор базовой кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 2680-1505, ORCID: 0000-0002-6939-1658; e-mail: marianna300@yandex.ru

Азанов Матвей Васильевич, ассистент базовой кафедры энергетического машиностроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 6483-4716, ORCID: 0000-0003-3053-9210; e-mail: azanov-mv@rudn.ru

Задиранов Александр Никитович, доктор технических наук, профессор кафедры процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4, стр. 2; eLIBRARY SPIN-код: 2873-6465, ORCID: 0000-0001-7787-8290; e-mail: zadiranov@mail.ru

Азанов Алексей Васильевич, аспирант кафедры техники и технологий транспорта, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 3965-5177, ORCID: 0009-0008-4297-1696; e-mail: aav-26.02@yandex.ru

Сагадеев Рустам Амирович, студент кафедры физики наноразмерных систем института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; ORCID: 0009-0004-6885-5125; e-mail: Rustam.Sagadeev.93@mail.ru

About the authors

Kristina B. Deynova, Postgraduate student of the Basic Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2640-1910, ORCID: 0009-0002-1864-9564; e-mail: kristina.deinova@yandex.ru

Marianne Yu. Malkova, D. Sc. (Technology), Professor of the Basic Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2680-1505, ORCID: 0000-0002-6939-1658; e-mail: marianna300@yandex.ru

Matvey V. Azanov, Assistant Lecturer at the Basic Department of Power Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 6483-4716, ORCID: 0000-0003-3053-9210; e-mail: azanov-mv@rudn.ru

Alexander N. Zadiranov, Doctor of Technical Sciences, Professor of Combustion Behavior and Environmental Safety Department, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4 Boris Galushkin St, buil. 2, Moscow, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2873-6465, ORCID: 0000-0001-7787-8290; e-mail: zadiranov@mail.ru

Alexey V. Azanov, Postgraduate student of the Department of Engineering and Technology of Transport, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3965-5177, ORCID: 0009-0008-4297-1696; e-mail: aav-26.02@yandex.ru

Rustam A. Sagadeev, Student of the Department of Physics of Nanoscale Systems, South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-6885-5125; e-mail: Rustam.Sagadeev.93@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-109-121

EDN: HYVDAO

Научная статья / Research article

Коррозионный износ тонкостенных элементов конструкций под воздействием магнитного поля

Р.Р. Гиниятуллин¹, С.Н. Якупов¹, Н.М. Якупов¹, Г.Х. Низамова²

¹ Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

✉ yzsr@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 30 марта 2025 г.

Доработана: 20 июля 2025 г.

Принята к публикации: 27 сентября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Металлические элементы конструкций продолжают оставаться основным конструкционным материалом многих современных конструкций, к которым предъявляются высокие требования по обеспечению безаварийной и безотказной работы. В процессе эксплуатации элементы конструкций деформируются и находятся под воздействием физических полей и сред. Особую опасность представляют случаи, когда имеют место два и более источника разрушения. В работе приведены некоторые результаты экспериментально-теоретических исследований влияния электромагнитного поля и направление его силовых линий на коррозионный износ стальных тонкостенных элементов, а также влияние магнитного поля на коррозию деформированных тонкостенных образцов. Эксперименты выполнялись в городских условиях и за пределами города. Образцы выдерживались в исследуемой среде в течение заданного времени. Деформации образцов создавались различными подходами. Для оценки степени коррозионного износа и определения механических свойств образцов используется экспериментально-теоретический подход. Для вычисления тангенциальных и изгибных жесткостей образцов используются соотношения для случая среднего изгиба. Установлено, что коррозионный износ образцов без воздействия магнитного поля выше, чем образцов, находившихся под воздействием магнитного поля. Больше коррозии подвержены образцы, поверхности которых параллельны силовым линиям магнитного поля Земли. Установлено также, что тангенциальная жесткость недеформированных образцов под воздействием магнитного поля несколько выше соответствующих жесткостей растянутых образцов, при этом изгибная жесткость растянутых образцов больше изгибных жесткостей недеформированных образцов. Обнаружены новые эффекты, имеющие важное теоретическое и практическое значение.

Ключевые слова: коррозия, деформированные образцы, силовые линии магнитного поля, остаточная намагниченность, деформация поверхности

Вклад авторов

Гиниятуллин Р.Р. — экспериментальные исследования, обработка и обсуждение результатов, выводы; Якупов С.Н. — экспериментальные исследования, обработка и обсуждение результатов, выводы, написание текста; Якупов Н.М. — постановка задачи, обзор, обработка и анализ результатов, выводы; Низамова Г.Х. — материалы для обзора, обсуждение результатов, подготовка статьи для публикации. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н., Якупов Н.М., Низамова Г.Х., 2026








This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Для цитирования


Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н., Якупов Н.М., Низамова Г.Х. Коррозионный износ тонкостенных элементов конструкций под воздействием магнитного поля // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 109–121. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-109-121> EDN: HYVDAO

Corrosion Wear of Thin-Walled Structural Elements Under Magnetic Field Exposure

Rishat R. Giniyatullin¹, Samat N. Yakupov¹,
Nukh M. Yakupov¹, Guzial Kh. Nizamova²

¹ Federal Research Center “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”, *Kazan, Russian Federation*

² Moscow State University of Civil Engineering, *Moscow, Russian Federation*

 yzsrr@mail.ru

Article history

Received: March 30, 2025

Revised: July 20, 2025

Accepted: September 27, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. Metal structural elements remain the primary construction material in many modern structures, which are subject to stringent requirements for safe and reliable operation. During service, structural elements undergo deformation and are exposed to various physical fields and environmental conditions. Situations involving two or more concurrent degradation factors pose particular risks. This study presents selected results of experimental and theoretical studies on the influence of an electromagnetic field and the orientation of its field lines on the corrosion wear of thin-walled steel elements. It also examines the effect of a magnetic field on the corrosion behavior of deformed thin-walled samples. The experiments were conducted in both urban and rural environments. The samples were exposed to the test environment for a specified period. Deformation was introduced using different methods. An experimental — theoretical approach was employed to evaluate the degree of corrosion wear and to determine the mechanical properties of the samples. Tangential and bending stiffness were calculated using relationships derived for the case of pure bending. The results indicate that corrosion wear is greater in samples not subjected to a magnetic field than in those exposed to magnetic field effects. Samples with surfaces oriented parallel to the Earth’s magnetic field lines exhibit more pronounced corrosion. It was also found that the tangential stiffness of undeformed samples under magnetic field exposure is slightly higher than that of tensile-deformed samples, whereas the bending samples of tensile-deformed samples exceeds that of undeformed ones. The study reveals new effects of both theoretical and practical significance.

Keywords: corrosion, deformed samples, magnetic field lines, residual magnetization, surface deformation

Authors’ contribution

Giniyatullin R.R. — experimental research, processing and discussion of results, conclusions; *Yakupov S.N.* — experimental research, processing and discussion of results, conclusions; *Yakupov N.M.* — statement of the problem, review, processing and analysis of results, conclusions; *Nizamova G.Kh.* — materials for the review, discussion of results, preparation of the article for publication. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Giniyatullin RR, Yakupov SN, Yakupov NM, Nizamova GK. Corrosion wear of thin-walled structural elements under magnetic field exposure. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):109–121. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-109-121> EDN: HYVDAO

Введение

Конструкции и сооружения предназначены для выполнения заданных функций. Если природные конструкции восхищают нас своим совершенством, то рукотворные конструкции далеки от совершенства. Методом проб и ошибок человек познавал тайны конструкций и материалов, оценивал их прочность и долговечность, устанавливал причины разрушения [1–4].

Несмотря на широкий ассортимент используемых материалов в настоящее время, железо и его сплавы продолжают оставаться основным конструкционным материалом многих современных конструкций и сооружений. Изделия из железа были известны уже в XIV в. до н.э. в государствах Малой Азии. Известна информация об удивительном сплаве «булате» на Востоке (V–VI вв.), о литейном производстве наших предков в Волжской Болгарии (X–XII вв.), о чугунных мостах и железных дорогах в Западной Европе (XVIII в.) и т.д. [5–7].

С появлением металлических изделий возникла и проблема коррозии. Коррозия конструкций и сооружений наносит большой вред: помимо загрязнения окружающей среды она приводит к существенному снижению их несущей способности. Происходит утонение и изменение механических свойств по толщине элементов конструкций, образованию на поверхности элементов конструкций локальных углублений, вызывающих концентрацию напряжений. Концентраторы напряжений в свою очередь могут ускорять износ конструкций [8–13]. Возрастает необходимость углубления знаний в изучении коррозии как явления, с учетом влияния различных факторов, а также изыскание новых и совершенствование известных способов защиты от коррозии.

Природа предусмотрела способ защиты поверхности металла от коррозии образованием тонкого защитного пассивирующего слоя, который не позволяет кислороду воздуха и воде проникнуть в более глубокие слои, предохраняя металл от окисления. Явление пассивации исследовано М. Фарадеем [14], сделавшим

заключение об образовании на границе «металл — кислота» защитного слоя. В дальнейшем явление пассивации оформилось в виде теории, согласно которой на поверхности металла образуется тонкая оксидная пленка. Некоторые модели коррозионного износа отмечены в [15–20].

Коррозионный износ металла на деформированных и недеформированных элементах конструкций характеризуется зависимостью скорости i его анодного растворения от величины анодного потенциала φ . Эта зависимость задаётся потенциалами пассивации φ_p , активации φ_a и перепассивации φ_{pp} (рис. 1).

Пассивирующий слой до некоторого потенциала φ_{pp} замедляет коррозию и тем самым защищает поверхность металла от износа. На сохранность защитного слоя влияют различные факторы. Для обеспечения необходимого качества конструкций на срок эксплуатации необходимо учитывать эти факторы.

Изучению влияния магнитного поля на коррозионный износ уделяется определенное внимание [21–38].

Исследования подтверждают, что магнитные поля могут оказывать различное влияние на процесс коррозии, изменяя поведение электрохимических процессов и механизмы разрушения материала.

Влияние магнитных полей на коррозионный износ тонкостенных конструкций имеет большое практическое значение. В частности, влияние приложенного магнитного поля на растворение и пассивацию железа в серной кислоте исследовано в [21], коррозионное поведение низкоуглеродистой стали в водопроводной воде, обработанной постоянным магнитным полем, рассмотрено в [22]. Некоторые аспекты влияния на разрушение защитного слоя магнитного поля рассмотрены в [23; 24; 28], а ультрафиолетового излучения в [29]. Реже встречаются работы по исследованию ориентации силовых линий магнитного поля относительно поверхности материала [31] и влияния остаточного магнитного поля на коррозию тонкостенных элементов конструкций [32; 36].

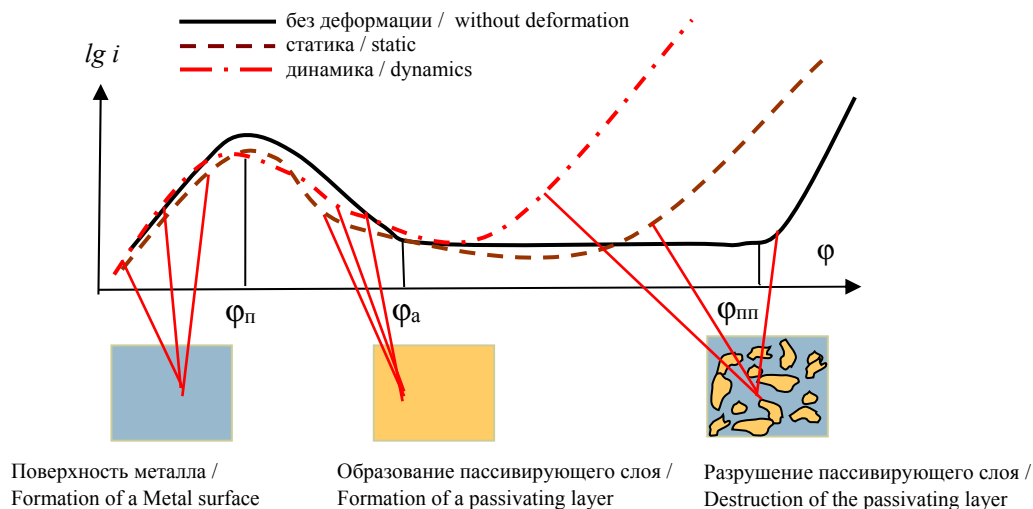


Рис. 1. Характерная зависимость скорости анодного растворения металла / от потенциала ϕ
Источники: выполнено С.Н. Якуповым.

Figure 1. Characteristic dependence of the rate of anodic dissolution of metal / on the potential ϕ
Source: by S.N. Yakupov.

Результаты исследований влияния магнитного поля на коррозию стали в растворе хлорида натрия (NaCl) и активного растворения приведены в [25–26]. Влияние магнитных полей на анодное поведение и локальную коррозию железа в растворах серной кислоты рассмотрено в [27]. Результаты исследования коррозионного воздействия потока Li-Pb на поверхность стали P91 в присутствии магнитного поля приведены в [29]. Отсутствуют работы по изучению влияния магнитного поля на деформированные тонкостенные элементы конструкции. Известны также патенты на изобретение, в частности № 2175737, посвященные рассматриваемой теме. Комбинированное влияние магнитного поля и потока на процесс коррозии углеродистой стали API 5L X65 исследовано в [34]. Морфология поверхности корродированных образцов была изучена с помощью сканирующего электронного микроскопа. Влияние магнитных полей на коррозию сплава LaFe13.9Si1.4 рассмотрено в [35]. Установлено, что присутствие магнитных полей оказывает значительное влияние на скорость коррозии: погружение в магнитные поля 1 Тл в течение

72 ч привело к значительному снижению скорости коррозии.

В [37] исследовано коррозионное поведение сплава La(Fe,Si) с помощью электрохимических измерений в условиях с нулевым, параллельным и перпендикулярным магнитными полями. Установлено, что как параллельные, так и перпендикулярные магнитные поля оказывают подавляющее воздействие на скорость коррозии из-за комбинированного влияния магнитогидродинамических сил и градиентных сил магнитного поля; при этом эффективность параллельного поля снижалась с увеличением периода воздействия, в то время как эффективность перпендикулярного поля продолжала увеличиваться с течением времени. Такой эффект для конструкционной стали установлен авторами статьи еще в 2015 г. [31].

Знание закономерностей коррозии при воздействии различных физических полей может быть использовано при создании новых конструкционных материалов, проектировании и эксплуатации конструкций и сооружений, а также при разработке эффективных способов защиты конструкций от износа.

Результаты и обсуждение

Влияние электромагнитного поля на коррозионный износ

Выполнены исследования по изучению влияния магнитного поля на коррозию стальных тонкостенных элементов толщиной 0,5 и 0,6 мм в воде и в кислой среде соответственно. Схема установки приведена на рис. 2. На обмотки катушки прикладывалось напряжение 50 В. Контрольные образцы размещались вне зоны действия электромагнита. В первом цикле исследования средняя толщина образцов, выдержанных в среде 79 сут, составила 0,475 мм, а во втором цикле — выдержанных в среде 72 сут — 0,590 мм; толщины контрольных образцов составили соответственно 0,452 и 0,577 мм.

Для определения жесткостных свойств образцов использовался экспериментально-теоретический подход [38–39], патент РФ № 2296976¹; для вычисления тангенциальных B и изгибных D жесткостей образцов использовались соотношения для случая сред-негоизгиба по классификации профессора Х.М. Муштари.

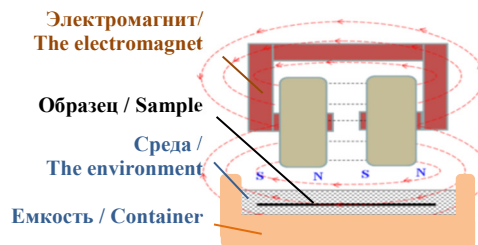


Рис. 2. Схема установки
Источник: выполнено С.Н. Якуповым.
Figure 2. Installation diagram
Source: by S.N. Yakupov.

На рис. 3 и 4 представлены изменения тангенциальных B и изгибных D жесткостей образцов от давления P для первого и второго циклов исследований соответственно.

Как видно из графиков на рис. 3 и 4, тангенциальные и изгибные жесткости контрольных образцов существенно ниже, чем тангенциальные жесткости образцов, находившихся в агрессивной среде под воздействием магнитного поля. Таким образом, коррозионный износ образцов в водной и кислой средах без воздействия магнитного поля выше, чем образцов, находившихся в агрессивной среде под воздействием магнитного поля.

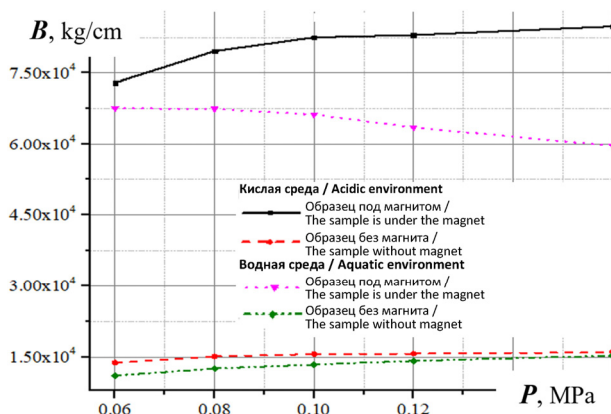


Рис. 3. Зависимость «давление P — жесткость B »
Источники: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 3. The relationship “pressure P — stiffness B ”
Source: made by R.R. Giniyatullin

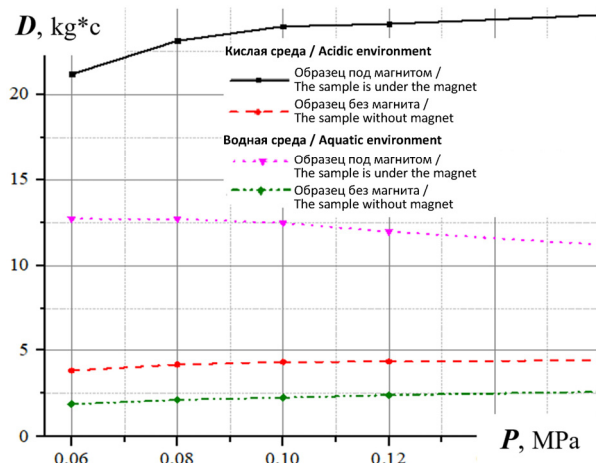


Рис. 4. Зависимость «давление P — жесткость D »
Источники: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 4. The relationship “pressure P — stiffness D ”
Source: made by R.R. Giniyatullin

¹ Нурғалиев А.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Способ испытаний образцов металлических мембран под напряжением и устройство для его осуществления. Патент № 2296976. 2007. URL: <https://allpatents.ru/patent/2296976.html> (дата обращения: 20.05.2025).

Можно также отметить, что как тангенциальные, так и изгибные жесткости контрольных образцов остаются практически на одном уровне, а жесткости образцов, подверженных воздействию магнитного поля, с увеличением давления изменяются: для образцов, находившихся в кислой среде, наблюдается упрочнение, а для образцов, находившихся в водной среде, — снижение жесткости.

Влияние направления силовых линий магнитного поля Земли на коррозию

Практически не встречаются исследования влияния направления силовых линий магнитного поля Земли на процесс коррозии металлических образцов. Выполнены исследования по изучению влияния направления силовых линий магнитного поля на коррозию стальных тонкостенных элементов толщиной 0,5 и 0,6 мм в воде и в кислой среде.

Выполнены одновременно два независимых эксперимента: в городских условиях и за пределами города. В частности, две группы исследуемых тонких круглых образцов (по десять в каждой) размещаются в одной емкости с агрессивной средой. При этом силовые линии земного магнитного поля пронизывают первую группу (*N-S*) образцов перпендикулярно поверхности, а вторую (*W-E*) — по касательной к поверхности (рис. 5).

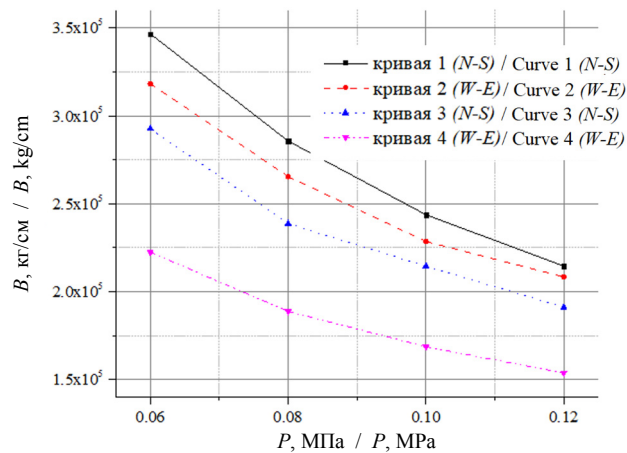


Рис. 6. Зависимость «давление P — жесткость B »

Источники: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным

Figure 6. «Pressure P — stiffness B » relationship
Source: by R.R. Giniyatullin

Образцы выдерживаются в исследуемой среде в течение заданного времени.

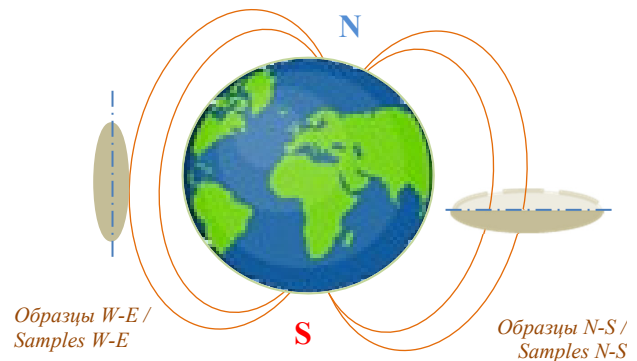


Рис. 5. Схема расположения образцов к магнитному полю Земли

Источники: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 5. Layout of the samples relative to the Earth's magnetic field
Source: by R.R. Giniyatullin.

В каждом эксперименте рассматривались образцы из стали марки Ст3 с исходной толщиной $h = 0,6$ мм, которые подвергались коррозионному износу в среде 16 % гипохлорита натрия в течение 30 сут. Для каждого образца экспериментально-теоретическим методом [38–39] по средним значениям прогибов построены кривые «давление P — прогиб H », вычислены тангенциальные B (рис. 6) и изгибные D (рис. 7) жесткости образцов от давления P .

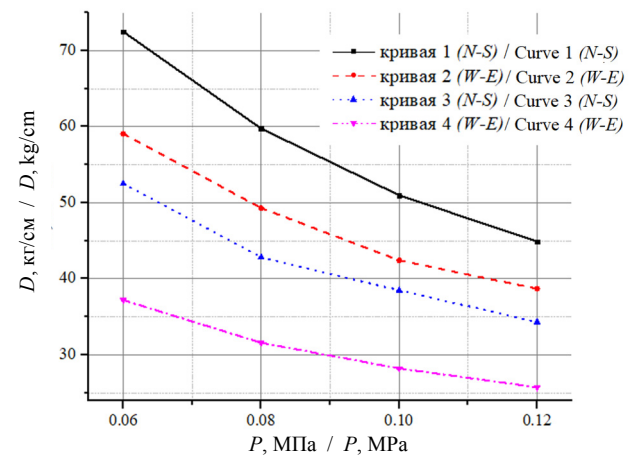


Рис. 7. Зависимость «давление P — жесткость D »

Источники: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным

Figure 7. «Pressure P — stiffness D » relationship
Source: by R.R. Giniyatullin.

Впервые обнаружено влияние направления силовых линий магнитного поля Земли на процесс коррозии металлических образцов: большому износу подвержены образцы, поверхности которых параллельны силовым линиям магнитного поля Земли. Полученные результаты включены в следующие работы:

- Отчет о деятельности РАН в 2006 г.
- Основные результаты в области естественных, технических, гуманитарных и общественных наук. Механика. Москва : Наука, 2007. С. 62;
- Отчетный доклад Президиума Российской академии наук «Научные достижения РАН в 2009 году». Москва : Наука, 2010. С. 137.

О степени износа рассмотренных образцов свидетельствует изменение значений толщин образцов: среднее значение толщины образцов из первого эксперимента для группы (*N-S*) составило 0,464 мм, а для группы (*W-E*) — 0,448 мм; среднее значение толщины образцов

из второго эксперимента — соответственно 0,501 и 0,472 мм. Этот эффект можно объяснить, в частности, тем, что магнитное поле, возникающее на поверхности образца из группы (*N-S*), создает дополнительную силу притяжения пассивирующего слоя к основе образца.

Влияние магнитного поля на коррозию деформированных образцов

Деформации на поверхностях образцов создавались на базе патентов на изобретения РФ № 2296976, № 2439537, № 2437077³: путем подачи поверхностного давления на закрепленный по контуру круглый образец (рис. 8, *а*), путем стягивания двух противоположных контуров прямоугольного образца (рис. 8, *б*) и путем деформирования двух круглых образцов по круговому контуру, подкладывая между образцами эллипсоидальную шайбу (рис. 8, *в*). При этом производилась покраска одной из сторон образца.

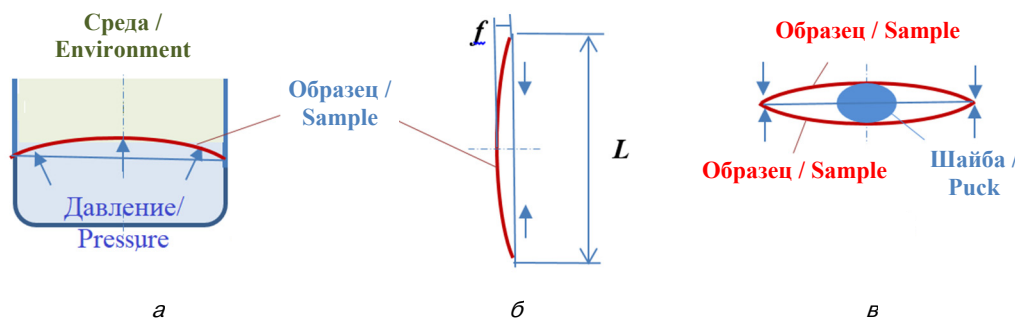


Рис. 8. Схемы деформирования образцов:
а — круглый образец; *б* — прямоугольный образец; *в* — эллипсоидальная шайба
 Источник: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 8. Deformation patterns of the samples:
a — round sample; *b* — round sample; *v* — ellipsoidal puck
 Source: by R. R. Giniyatullin.

³ Нургалиев А.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Способ испытаний образцов металлических мембран под напряжением и устройство для его осуществления. Патент №2296976. 2007. URL: <https://allpatents.ru/patent/2296976.html> (дата обращения: 20.05.2025); Гиниятуллин Р.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Способ испытания тонкостенных образцов под напряжением и устройство «летающая тарелка» для его осуществления. Патент № 2437077. 2012. URL: <https://allpatents.ru/patent/2439537.html> (дата обращения: 20.05.2025); Антонов В.Г., Велиюлин И.И., Гиниятуллин Р.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Способ испытания тонкостенных образцов под напряжением и устройство «летающая тарелка» для его осуществления. Патент № 2437077. 2011. URL: <https://allpatents.ru/patent/2437077.html> (дата обращения: 20.05.2025).

При исследовании коррозионного износа деформированных образцов под воздействием магнитного поля был рассмотрен вариант деформирования по рис. 8, б: рассматривались пластины толщиной 0,5 мм и размером в плане 240×140 мм ($f/L = 15/240 = 0,0625$).

Деформированные образцы помещались в агрессивную среду на основе соляной кислоты, и на эту систему прикладывалось магнитное

поле напряженностью 70 Гс. Для оценки степени коррозионного износа и определения механических свойств образцов, выдержанных заданное время в среде, использовался экспериментально-теоретический подход [38–39].

На рис. 9 представлены фотоснимки поверхности деформированных образцов после воздействия магнитного поля и коррозионной среды при 4-кратном увеличении.

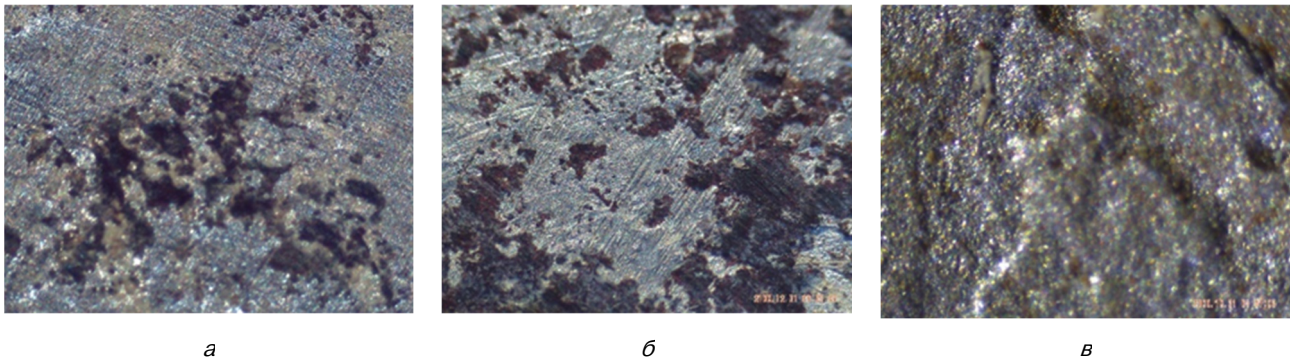


Рис. 9. Фотоснимки образцов:
a — недеформированные; *б* — сжатая поверхность; *в* — растянутая поверхность
 Источник: выполнено С.Н. Якуповым

Figure 9. Photographs of the samples:
a — unreformed; *б* — compressed surface; *в* — stretched surface
 Source: by S. N. Yakupov

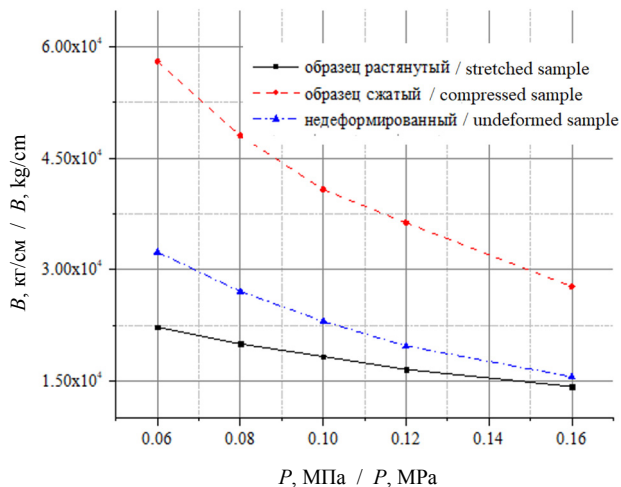


Рис. 10. Зависимость тангенциальной жесткости *B* от давления *P*
 Источник: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 10. Dependence of tangential stiffness *B* on pressure *P*
 Source: by R. R. Giniyatullin.

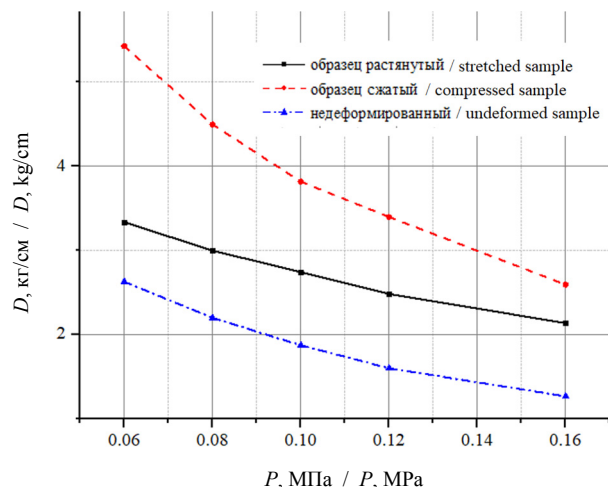


Рис. 11. Зависимость изгибной жесткости *D* от давления *P*
 Источник: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 11. Dependence of bending rigidity *D* on pressure *P*
 Source: by R. R. Giniyatullin.

На рис. 10 и 11 представлены изменения тангенциальных B и изгибных D жесткостей образцов от давления P соответственно.

Как видно из графиков (рис. 10 и 11), тангенциальные и изгибные жесткости сжатых образцов имеют максимальные значения. При этом тангенциальная жесткость недеформированных образцов несколько выше соответствующих жесткостей растянутых образцов, а изгибная жесткость растянутых образцов больше изгибных жесткостей недеформированных образцов.

Можно также отметить, что как тангенциальные, так и изгибные жесткости рассмотренных образцов с увеличением давления падают.

Заключение

К современным тонкостенным конструкциям предъявляются высокие требования по обеспечению безаварийной и безотказной работы конструкций. Особую опасность для тонкостенных конструкций представляют случаи, когда имеют место два и более источника разрушения. Экспериментально-теоретическим методом выполнены исследования влияния магнитного поля и направление его силовых линий на коррозионный износ стальных тонкостенных элементов, а также влияние магнитного поля на коррозию деформированных тонкостенных образцов. Жесткости контрольных образцов, находившихся в агрессивной среде без воздействия магнитного поля, существенно ниже, чем жесткости образцов, подверженных воздействию магнитного поля. Таким образом, коррозионный износ образцов без воздействия магнитного поля выше, чем образцов, находившихся в агрессивной среде под воздействием магнитного поля. Жесткости образцов, находившихся в кислой среде, с увеличением давления увеличиваются, а для образцов, находившихся в водной среде, наблюдается снижение жесткости. Тонкостенные образцы, поверхности которых параллельны силовым линиям магнитного поля Земли, подвержены большей коррозии, чем образцы, поверхности которых перпендикулярны линиям магнитного поля. Тангенциальная жест-

кость недеформированных образцов под воздействием магнитного поля несколько выше соответствующих жесткостей растянутых образцов, при этом изгибная жесткость растянутых образцов больше изгибных жесткостей недеформированных образцов. Обнаруженные эффекты имеют важное теоретическое и практическое значение.

Список литературы

1. Afzal M., Liu Y., Cheng J.C.P., Gan V.J.L. Reinforced concrete structural design optimization: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 260. Article no. 120623. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120623> EDN: QRLJNG
2. Pilla D.R. Elementary Structural Analysis and Design of Buildings a Guide for Practicing Engineers and Students. CRC Press, 2019. 272 p. ISBN 9780367028046
3. Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov N.M. Mukhamedova I.Z. A new variant of the fem for evaluation the strenght of structures of complex geometry with heterogeneous material structure // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. Article no. e02360. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02360> EDN: GBELQN
4. Li D.Y. Corrosive Wear // Encyclopedia of tribology / Q.J. Wang, Y.W. Chung (eds). Boston: Springer, MA, 2013. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_866
5. Cast-Iron Steel // Scientific American Magazine. 1847. Vol. 2. No. 31. P. 244. URL: <https://www.scientificamerican.com/issue/sa/1847/04-24/> (дата обращения: 20.09.2025).
6. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. Состояние конструкций градирен и предотвращение их разрушения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. № 7–8. С. 36–42. EDN: KFQKHL
7. Семькин Ю.А. Черная металлургия и кузнечное производство Волжской Булгарии в VIII — начале XIII вв. Казань : Отечество, 2015. 228 с. ISBN 978-5-9222-1001-0
8. Collins J.A. Collins Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention: 2nd ed. New York : Wiley Publ., 1993. 629 p. ISBN 10 0471050245
9. Якупов Н.М., Нургалиев А.Р. Влияние механических дефектов на свойства нагруженных тонкостенных элементов конструкций в агрессивной среде // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. № 3. С.14–18. EDN: JWQEVN
10. Hansson C.M. The Impact of Corrosion on Society // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2011. Vol. 42. No. 10. P. 2952–2962. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0703-2> EDN: FOWORA

11. Якупов С.Н., Тамеев И.М., Якупов Н.М. Диагностика и лечение трубопроводов. Казань : АО «ИД «Казанская недвижимость», 2018. 180 с. ISBN 978-5-9909918-8-0
12. Linardi E., Tordoya D.V., Collet-Lacoste J.R. About the electrochemical mechanism of aluminium corrosion in acid media by electrochemical impedance spectroscopy // *Materials and Corrosion*. 2025. Vol. 76. No. 9. P. 1353–1364. <https://doi.org/10.1002/maco.202514809>
13. Bender R., Féron D., Mills D., Ritter S., Bäßler R., Bettge D., De Graeve I., Dugstad A., Grassini S., Hack T., Halama M., Han En.H., Harder T., Hinds G., Kittel J., Krieg R., Leygraf Ch., Martinelli L., Mol A., Neff D. et al. Corrosion challenges towards a sustainable society // *Materials and Corrosion — Werkstoffe und Korrosion*. November 2022. Vol. 73. Issue 11. P. 1730–1751. <https://doi.org/10.1002/maco.202213140> EDN: DITDFO
14. Weinberger P., Weinberger P. Faraday and the Philosophical Magazine // *Philosophical Magazine A*. 2013. Vol. 93. No. 13. P. 1455–1467. <https://doi.org/10.1080/14786435.2012.74488115>.
15. Сидоренко С.Н., Якупов Н.М. Коррозия — союзник аварий и катастроф. Москва : РУДН, 2002. 93 с. ISBN 5-209-02197-1
16. Велиюлин И.И., Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р., Гиниятуллин Р.Р., Нургалеев А.Р. Модели коррозионного износа // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2015. № 1. С. 57–67. EDN: TYNWKV
17. Акимов Г.В. Основы учения о коррозии и защите металлов. Москва : URSS, 2021. 464 с.
18. Корнишин М.С., Карпунин В.Г. К устойчивости пластин и оболочек с учетом общей коррозии // *Сборник трудов семинара по теории оболочек*. Казань : КФТИ АН СССР, 1975. С. 58–66.
19. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. Москва : Металлургия, 1981. 271 с.
20. Овчинников И.Г., Сабитов Х.А. К определению НДС и долговечности цилиндрических оболочек с учетом коррозионного износа // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1986. № 1. С.13–17.
21. Lu Z., Huang D., Yang W., Congleton J. Effects of an applied magnetic field on the dissolution and passivation of iron in sulphuric acid // *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45. Issue 10. P. 2233–2249. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00045-3) EDN: LVZWSH
22. Bikul'chyus G., Ruchinskene A., Deninis V. Corrosion behavior of low-carbon steel in tap water treated with permanent magnetic field // *Protection of metals*. 2003. Vol. 39. Issue 5. P. 443–447. <https://doi.org/10.1023/A:1025890601669> EDN: LVZWTV
23. Tang Y.Ch., Davenport A.J. Magnetic Field Effects on the Corrosion of Artificial Pit Electrodes and Pits in Thin Films // *Journal of the Electrochemical Society*. 2007. Vol. 154. No. 7. P. 362–370. <https://doi.org/10.1149/1.2736662>
24. Alimi F., Tlili M., Ben Amor M., Maurin G., Gabrielli C. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation in the presence of foreign ions // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009. Vol. 45. No. 1. P. 56–62. <https://doi.org/10.3103/S1068375509010104>
25. Nasher L.S.H., Salash L.A.B.T. Study the effect of magnetic field on the corrosion of steel in sodium chloride solution (NaCl) // *Misan Journal Academic Studies*. 2010. Vol. 9. P. 30.
26. Sueptitz R., Tschulik K., Uhlemann M., Schultz L., Gebert A. Magnetic field effects on the active dissolution of iron // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56. No. 17. P. 5866–5871. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.04.126>
27. Sueptitz R., Tschulik K., Uhlemann M., Schultz L., Gebert A. Effect of high gradient magnetic fields on the anodic behaviour and localized corrosion of iron in sulphuric acid solutions // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. No. 10. P. 3222–3230. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.05.070>
28. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. Влияние магнитного поля на коррозионный износ // *Доклады Академии наук*. 2012. Т. 443. № 2. С.173–175. EDN: OWXKEL
29. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. Effect of ultraviolet radiation on the corrosive wear of steel samples // *Doklady Physics*. 2012. Vol. 57. No. 10. P. 393–395. <https://doi.org/10.1134/S1028335812100096> EDN: RGJNWH
30. Platadis E., Ziks A., Poznjak A., Muktepavela F., Shisko A., Sree S., Chakraborty P., Sanjay K., Vrushank M., Fotedar R., Rajendra E.K., Suri A.K. Investigation of the Li-Pb flow corrosion attack on the surface of P91 steel in the presence of magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. 2012. Vol. 48. No. 2. P. 343–350.
31. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. Effect of the Direction of the Earth's Magnetic Field Lines on Corrosive Wear // *Doklady Physical Chemistry*. 2015. Vol. 463. Part 2. P. 188–190. <https://doi.org/10.1134/S0012501615080072> EDN: UZWWHN
32. Ильясова А.И. Анализ влияния магнитного поля на свойства стали линейной части магистральных трубопроводов // *Нефтегазовое дело*. 2019. № 2. С. 156–167. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2019-2-156-168> EDN: ZDSLGX
33. Zhao Sh., Wang Y., Zhao Y., Sun X., Zhang H., Piao H.-G., Zhang Y., Huang Y. The effect of magnetic field pretreatment on the corrosion behavior of carbon steel in static seawater. *RSC Advances*. 2020. Issue 4. P. 2060–2066. <https://doi.org/10.1039/C9RA09079G> EDN: UZVBIB
34. Parapurath Sh., Ravikumar A., Vahdati N., Shiryayev O. Effect of Magnetic Field on the Corrosion of API-5L-X65 Steel Using Electrochemical Methods in

a Flow Loop // *Applied Science*. 2021. Vol. 11. No. 19. Article no. 9329. <https://doi.org/10.3390/app11199329> EDN: IKYGCN

35. Zhu C., Miao L., Xie J., Xu H., Han Y., Liu J., Ryan M.P., Guo L. Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys $\text{LaFe}_{13.9}\text{Si}_{1.4}\text{H}_y$ under paramagnetic states // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 968. Article no. 171901 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171901> EDN: STRCUY

36. Якупов С.Н., Кантюков Р.Р., Гумаров Г.Г., Якупов Н.М. Влияние остаточной намагниченности на коррозию стальных образцов // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2024. Т. 514. С. 46–49. <https://doi.org/10.31857/S2686740024010078> EDN: OPDVAH

37. Guo L., Zhu C., Wang H., Miao L., Liu J., Li Ju., Wang S., Lovell E., Wilson N., Cohen L.F., Ryan M.P. Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys $\text{LaFe}_{13.9}\text{Si}_{1.4}\text{H}_y$ under ferromagnetic states // *Journal of Alloys and Compounds*. 2025. Vol. 1017. Article no. 179002. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179002> EDN: OUZWPJ

38. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Якупов С.Н. Методика исследования неплоских пленок и мембран сложной структуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 2. С. 55–59. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59> EDN: YAHYTE

39. Yakupov S.N. Influence of Scratches on the Stiffness Properties of Thin-walled Elements // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019. Vol. 40. No. 6. P. 834–839. <https://doi.org/10.1134/S1995080219060258> EDN: GAIKNQ

References

1. Afzal M, Liu Yu, Cheng JCP, Gan VJL. Reinforced concrete structural design optimization: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2020;260:120623. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120623> EDN: QRLJNG

2. Pilla DR. *Elementary structural analysis and design of buildings a guide for practicing engineers and students*. CRC Press, 2019. ISBN 9780367028046

3. Yakupov SN, Kiyamov HG, Yakupov NM, Mukhamedova IZ. A new variant of the fem for evaluation the strength of structures of complex geometry with heterogeneous material structure. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;19:e02360. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02360> EDN: GBELQN

4. Li DY. Corrosive wear. In: Wang QJ, Chung YW, editors. *Encyclopedia of Tribology*. Boston Springer Publ.; 2013. p. 590–596. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_866

5. Cast-Iron Steel. *Scientific American Magazine*. 1847;2(31):244. <https://www.scientificamerican.com/issue/sa/1847/04-24/6>

6. Yakupov NM, Galyaviev ShSh, Nurgaliev AR, Yakupov SN. Condition of cooling tower structures and prevention of their failure. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2006;7-8:36–42. (In Russ.) EDN: KFQKHL

7. Semykin YuA. *Ferrous metallurgy and blacksmithing in Volga Bulgaria in the VIII — early XIII centuries*. Kazan: Otechestvo Publ.; 2015. (In Russ.) ISBN 978-5-9222-1001-0

8. Collins JA. *Collins Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention*. 2nd ed. New York: Wiley Publ.; 1993. ISBN 10 0471050245

9. Yakupov NM, Nurgaliev AR. Influence of mechanical defects on properties of the loaded thin-walled elements of designs in the excited environment. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2008;3:14–18. (In Russ.) EDN: JWQEVF

10. Hansson CM. The Impact of Corrosion on Society. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2011;42(10):2952–2962. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0703-2> EDN: FOWORA

11. Yakupov SN, Tameev IM, Yakupov NM. *Diagnostics and treatment of pipelines*. Kazan: Kazanskaya nedvizhimost Publ.; 2018. (In Russ.) ISBN 978-5-9909918-8-0

12. Linardi EM, Tordoya DV, Collet-Lacoste JR. About the electrochemical mechanism of aluminum corrosion in acid media by electrochemical impedance spectroscopy. *Materials and Corrosion*. 2025;76(9):1353–1364. <https://doi.org/10.1002/maco.202514809>

13. Bender R, Féron D, Mills D, Ritter S, Bäßler R, Bettge D, De Graeve I, Dugstad A, Grassini S, Hack T, Halama M, Han EnH, Harder T, Hinds G, Kittel J, Krieg R, Leygraf Ch, Martinelli L, Mol A, Neff D. et al. Corrosion challenges towards a sustainable society. *Materials and Corrosion — Werkstoffe und Korrosion*. 2022;73(11):1730–1751. <https://doi.org/10.1002/maco.202213140> EDN: DITDFO

14. Weinberger P. Faraday and the Philosophical Magazine. *Philosophical Magazine*. 2013;93(13):1455–1467. <https://doi.org/10.1080/14786435.2012.744881>

15. Sidorenko SN. *Corrosion as a contributor to accidents and catastrophes*. Moscow: RUDN Publ.; 2002. (In Russ.) ISBN 5-209-02197-1

16. Veliyulin II, Kantyukov RA, Yakupov NM, Tameev IM, Yakupov SN, Kantyukov RR, Giniyulin RR, Nurgaliev AR. Corrosion wear models. *Science and Technology in the Gas Industry*. 2015;1:57–67. EDN: TYNWKV

17. Akimov G.V. *Fundamentals of corrosion and protection of metals*. 2nd ed. Moscow: URSS Publ.; 2021. (In Russ.)

18. Kornishin MS, Karpunin VG. On the stability of plates and shells, taking into account general corrosion. *Proceedings of the Shell Theory Seminar are in the collection*. Kazan: KFTI AN SSSR, 1975;(6):58–66. (In Russ.)

19. Gutman EM. *Metal mechanochemistry and corrosion protection*. Moscow: Metallurgy Publ.; 1981. (In Russ.)
20. Ovchinnikov IG, Sabitov KhA. Determination of VAT and durability of cylindrical shells taking into account corrosion wear. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 1986;(1):13–17. (In Russ.)
21. Lu Z, Huang D, Yang W, Congleton J. Effects of an applied magnetic field on the dissolution and passivation of iron in sulphuric acid. *Corrosion Science*. 2003;45(10):2233–2249. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00045-3) EDN: LVZWSH
22. Bikul'chuyus G, Ruchinskene A, Deninis V. Corrosion behavior of low-carbon steel in tap water treated with permanent magnetic field. *Protection of metals*. 2003;39(5):443–447. <https://doi.org/10.1023/A:1025890601669> EDN: LVZWTV
23. Tang YCh, Davenport AJ. Magnetic Field Effects on the Corrosion of Artificial Pit Electrodes and Pits in Thin Films. *Journal of the Electrochemical Society*. 2007;154(7):362–370. <https://doi.org/10.1149/1.2736662>
24. Alimi F, Tlili M, Ben Amor M, Maurin G, Gabrielli C. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation in the presence of foreign ions. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009;45:56–62. <https://doi.org/10.3103/S1068375509010104>
25. Nasher SH, Salash Ai-Mosawi BT. Study the effect of magnetic field on the corrosion of steel in sodium chloride solution (NaCl). *Misan Journal Academic Studies*. 2010;9:30.
26. Sueptitz R, Tschulik K, Uhlemann M, Schultz L, Gebert A. Magnetic field effects on the active dissolution of iron. *Electrochimica Acta*. 2011;56(17):5866–5871. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.04.126>
27. Sueptitz R, Tschulik K, Uhlemann M, Schultz L, Gebert A. Effect of high gradient magnetic fields on the anodic behaviour and localized corrosion of iron in sulphuric acid solutions. *Corrosion Science*. 2011;53(10):3222–3230. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.05.070>
28. Yakupov NM, Giniyatullin RR, Yakupov SN. Effect of a magnetic field on corrosive wear. *Doklady Physics*. 2012;57(3):104–106. <https://doi.org/10.1134/S102833581203007X> EDN: PDRUZJ
29. Yakupov NM, Giniyatullin RR, Yakupov SN. Effect of ultraviolet radiation on the corrosive wear of steel samples. *Doklady Physics*. 2012;57(10):393–395. <https://doi.org/10.1134/S1028335812100096> EDN: RGJNWH
30. Platacis E, Ziks A, Poznjak A, Muktepavela F, Shisko A, Sree S, Chakraborty P, Sanjay K, Vrushank M, Fotedar R, Rajendra EK, Suri AK. Investigation of the Li-Pb flow corrosion attack on the surface of P91 steel in the presence of magnetic field. *Magneto hydrodynamics*. 2012;48(2):343–350.
31. Yakupov NM, Giniyatullin RR, Yakupov SN. Effect of the direction of the earth's magnetic field lines on corrosive wear. *Doklady Physical Chemistry*. 2015;463(2):188–190. <https://doi.org/10.1134/S0012501615080072> EDN: UZWWHN
32. Ilyasova AI. Magnetic field influence on the steel properties of the main pipelines linear part. *Electronic Scientific Journal Oil and Gas Business*. 2019;2:156–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/ogbus-2019-2-156-168> EDN: ZDSLGX
33. Zhao Sh, Wang Y, Zhao Y, Sun X, Zhang H, Piao H-G, Zhang Y, Huang Y. The effect of magnetic field pretreatment on the corrosion behavior of carbon steel in static seawater. *RSC Advances*. 2020;4:2060–2066. <https://doi.org/10.1039/C9RA09079G> EDN: UZVBIB
34. Parapurath Sh, Ravikumar A, Vahdati N, Shiryayev O. Effect of Magnetic Field on the Corrosion of API-5L-X65 Steel Using Electrochemical Methods in a Flow Loop. *Applied Science*. 2021;11(19):9329. <https://doi.org/10.3390/app11199329> EDN: IKYGCN
35. Zhu C, Miao L, Xie J, Xu H, Han Y, Liu J, Ryan MP, Guo L. Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys LaFe_{13.9}Si_{1.4}H_y under paramagnetic states. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;968:171901. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171901> EDN: STRCUY
36. Yakupov SN, Kantyukov RR, Gumarov GG, Yakupov NM. Effect of residual magnetization corrosion of steel samples. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences*. 2024;514(1):46–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2686740024010078> EDN: OPDVAH
37. Guo L, Zhu C, Wang H, Miao L, Liu J, Li Ju, Wang S, Lovell E, Wilson N, Cohen LF, Ryan MP. Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys LaFe_{13.9}Si_{1.4}H_y under ferromagnetic states. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025;1017:179002. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179002> EDN: OUZWPJ
38. Yakupov NM, Galimov NK, Yakupov SN. Methodology of studying non-planar films and membranes of complex structure. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2019;85(2):55–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59> EDN: YAHYTE
39. Yakupov SN. Influence of Scratches on the Stiffness Properties of Thin-walled Elements. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019;40(6):834–839. <https://doi.org/10.1134/S1995080219060258> EDN: GAIKNQ

Сведения об авторах

Гиниятуллин Ришат Рашидович, кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт механики и машиностроения, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31; eLIBRARY SPIN-код: 7606-3211, ORCID: 0000-0003-2176-6913; e-mail: true_way@mail.ru.

Якупов Самат Нухович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт механики и машиностроения, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31; eLIBRARY SPIN-код: 7382-4759, ORCID: 0000-0003-0047-3679; e-mail: tamas_86@mail.ru

Якупов Нух Махмудович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт механики и машиностроения, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31; eLIBRARY SPIN-код: 2933-5615, ORCID: 0000-0001-8248-1589; E-mail: yzsrr@mail.ru

Низамова Гузаль Хавасовна, кандидат технических наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 3895-0028, ORCID: 0000-0002-7193-9125; e-mail: guzelnizamova2009@yandex.ru

About the authors

Rishat R. Giniyatullin, PhD in Technical Sciences, Researcher, Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science, Institute of Mechanics and Engineering, 2/32 Lobachevskogo St, Kazan, 420111, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7606-3211, ORCID: 0000-0003-2176-6913; e-mail: true_way@mail.ru.

Samat N. Yakupov, PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science, Institute of Mechanics and Engineering, 2/32 Lobachevskogo St, Kazan, 420111, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7382-4759, ORCID: 0000-0003-0047-3679; e-mail: tamas_86@mail.ru

Nukh M. Yakupov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science, Institute of Mechanics and Engineering, 2/32 Lobachevskogo St, Kazan, 420111, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2933-5615, ORCID: 0000-0001-8248-1589; e-mail: yzsrr@mail.ru

Guzial Kh. Nizamova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3895-0028, ORCID: 0000-0002-7193-9125; e-mail: guzelnizamova2009@yandex.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-122-130

EDN: IAHRII

Research article / Научная статья

Advances and Future Directions in Floating Buoy Technology for Marine Energy and Environmental Applications

Ngoc T. Pham 

Thuyloi University, Ha Noi, Vietnam

✉ thinkhtls@tlu.edu.vn

Article history

Received: 13 July, 2025

Revised: October 11, 2025

Accepted: October 20, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. Floating buoy technology has rapidly advanced and is integral to marine science, renewable energy harvesting, and environmental monitoring applications. This study synthesizes recent innovations in buoy designs, energy conversion technologies, and hybrid system integration. Key advancements include modular construction techniques, bio-inspired and hydrodynamic optimizations for improved stability and efficiency, and novel energy-harvesting mechanisms utilizing oscillating buoys, piezoelectric, and triboelectric systems. The integration of floating buoys with hybrid platforms, such as floating breakwaters and offshore wind turbines, demonstrates considerable potential for cost sharing and enhanced performance. Despite substantial progress, critical gaps remain, particularly in long-term operational validation, real-world performance under extreme conditions, scalability, and comprehensive environmental impact assessments. This study identifies these research gaps and outlines future directions to facilitate the widespread adoption of floating buoy technologies. The insights provided are crucial for guiding ongoing innovation, addressing existing limitations, and supporting sustainable blue-economy initiatives.

Keywords: Floating buoy technology, Wave energy conversion, Hybrid marine systems, Environmental monitoring, Renewable energy harvesting

Funding

The study was conducted with the financial support of the Department of Science and Technology of Ba Ria — Vung Tau Province (currently the Department of Science and Technology of Ho Chi Minh City) and as part of the research project “Assessment and pilot implementation of a floating debris collection system installed along the coastal area of Vung Tau City” (2024–2026).

For citation

Pham NT. Advances and future directions in floating buoy technology for marine energy and environmental applications. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):122–130. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-122-130> EDN: IAHRII

© Pham N.T., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Передовые разработки и перспективы применения плавучих буев в морской энергетике и экологическом мониторинге

Н.Т. Фам 

Университет Туйлой, Ханой, Вьетнам

✉ thinhtls@tlu.edu.vn

История статьи

Поступила в редакцию: 13 июля 2025 г.

Доработана: 11 октября 2025 г.

Принята к публикации: 20 октября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Технология плавучих буев стремительно развивается и становится важным компонентом морских научных исследований, сбора возобновляемой энергии и экологического мониторинга. В этом исследовании обобщены последние инновации в конструкции буев, технологиях преобразования энергии и интеграции гибридных систем. Ключевые достижения включают в себя модульную конструкцию, биоинспекцию и гидродинамическую оптимизацию для повышения стабильности и эффективности, а также новые механизмы сбора энергии, использующие колеблющиеся буи, пьезоэлектрические и трибоэлектрические системы. Интеграция плавучих буев с гибридными платформами, такими как плавучие волнорезы и морские ветряные турбины, демонстрирует значительный потенциал для распределения затрат и повышения производительности. Несмотря на значительный прогресс, остаются нерешенные вопросы, такие как надежность работы в реальных условиях, масштабируемость и комплексная оценка воздействия на окружающую среду. В настоящем исследовании выявлены эти пробелы и намечены будущие направления, способствующие широкому внедрению технологий плавучих буев. Представленные выводы имеют решающее значение для руководства дальнейшими инновациями, устранения существующих ограничений и поддержки инициатив устойчивого развития голубой экономики.

Ключевые слова: технологии плавучих буев, преобразование энергии волн, гибридные морские системы, экологический мониторинг, сбор возобновляемой энергии

Финансирование

Исследование проведено при финансовой поддержке Департамента науки и технологий провинции Ба Риа — Вунг Тау (ныне Департамент науки и технологий города Хошимин), в рамках исследовательского проекта «Оценка и пилотная реализация системы сбора плавающего мусора вдоль прибрежной зоны г. Вунгтау» (2024—2026 гг.).

Для цитирования

Pham N.T. Advances and future directions in floating buoy technology for marine energy and environmental applications // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 122–130. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-122-130> EDN: IAHRII

Introduction

Floating buoy technology has evolved significantly and has become indispensable in modern marine science, renewable energy solutions, navigation, and environmental monitoring. These floating structures serve diverse roles, including wave energy conversion, oceanographic data collection, weather monitoring, and offshore wind and aquaculture platform support [1–10]. Recent

research has focused on optimizing buoy designs to improve stability, enhance energy harvesting efficiency, and enable integration with hybrid systems, such as floating breakwaters and wind turbines [4–8; 11–14].

Technological advances have benefited from innovations in material science, modular construction methods, and enhanced power systems, including piezoelectric and triboelectric harvesters, solar panels, and hybrid energy modules. These

developments have enabled buoys to operate autonomously and reliably under harsh marine conditions [10; 15–18]. Moreover, amid the rising global demand for high-resolution oceanographic data and renewable marine energy, environmental sustainability, cost-effectiveness, and scalability have become critical considerations [19–21].

Despite significant progress, the literature highlights persistent gaps in long-term operational reliability, environmental impact assessments, and scalable deployment solutions for diverse marine settings. This review aims to synthesize current advancements in floating buoy technology, identify existing knowledge gaps, and outline future research directions to support the broader adoption of these systems. The ultimate goal is to promote innovation while advancing sustainable practices in the global ocean economy.

1. Methodology

A systematic and comprehensive literature review was conducted using the Semantic Scholar and PubMed databases. The search queries covered foundational concepts, applications, design optimization, interdisciplinary perspectives, and adjacent

technologies relevant to floating buoy systems. The review was limited to peer-reviewed journal articles published within the last five years to ensure relevance and currency.

A multi-stage filtering process was employed:

1. The initial search identified approximately 1,046 articles using targeted keywords related to buoy design, wave energy harvesting, environmental impact, and hybrid systems.

2. Articles were first screened based on their titles and abstracts, narrowing the selection to 642 relevant studies.

3. A full-text evaluation further reduced the pool to 597 eligible papers.

4. The 50 most rigorous and high-quality studies were selected based on criteria such as experimental validation, advanced simulation techniques, methodological rigor, and publication in Q1/Q2 journals indexed in the SCOPUS or Web of Science databases.

A flow diagram of the literature identification, screening, eligibility assessment, and inclusion process is shown in Figure 1. This visual representation outlines the structured approach to refining the initial pool of 1,046 studies to the 50 most relevant and high-quality papers selected for this review.

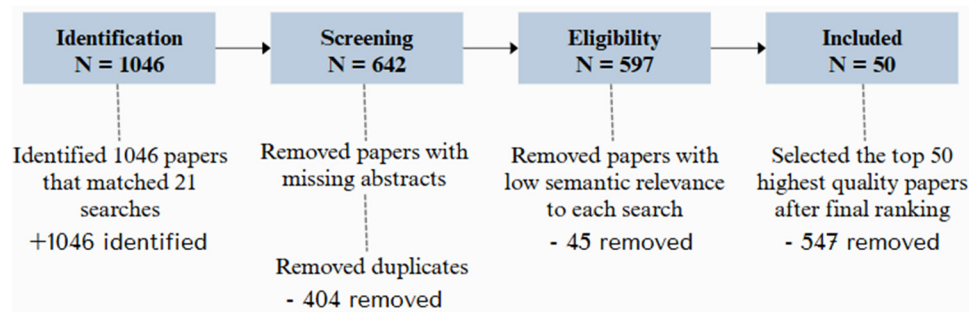


Figure 1. Flow diagram of the literature search and selection process

Source: by N.T. Pham.

The selected papers were categorized into key themes: design principles, energy harvesting technologies, practical applications, environmental concerns, and hybrid-system integration. The extracted data included research methods, key findings, scalability assessments, and identified gaps. A thematic synthesis and comparative

analysis were conducted to highlight trends, commonalities, divergences, and research needs in the current state of buoy technology.

A bibliometric analysis complemented this thematic classification to identify the most frequently cited authors and journals in the selected studies. Figure 2 visualizes the key contributors,

showing that scholars such as Cheng et al., Zhang et al., and Du et al. are among the most prominent authors. Additionally, journals such as Energy,

Applied Energy, and Ocean Engineering appeared most frequently, reflecting the interdisciplinary and energy-focused nature of the field.

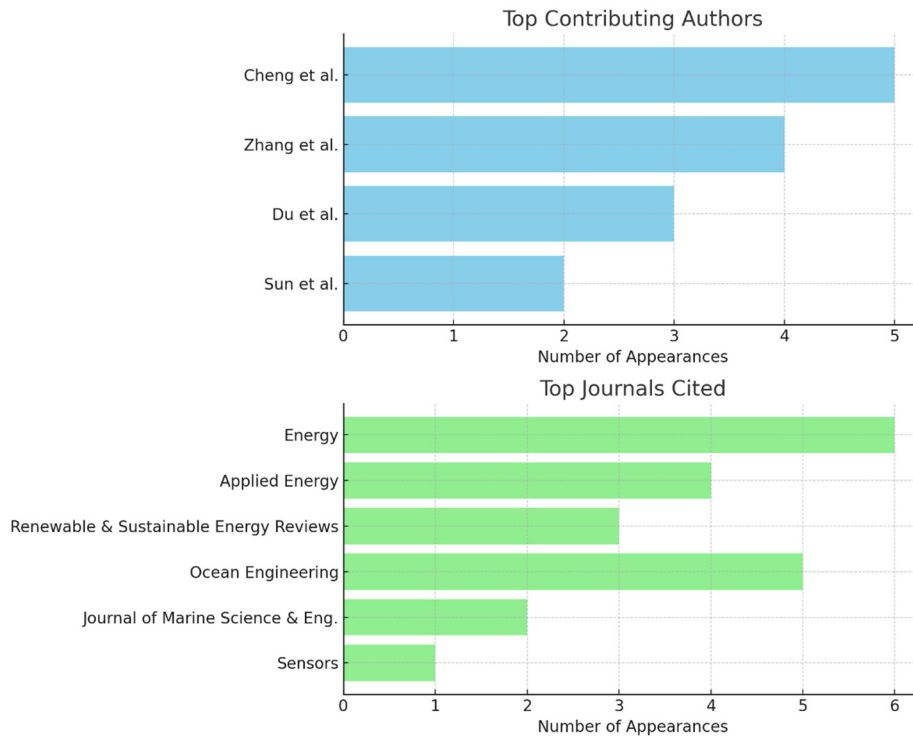


Figure 2. The authors and journals that appeared most frequently in the included papers.

Source: by Ngoc T. Pham.

2. Results

The analysis identified several major themes representing the current trends and innovations in floating buoy technology:

1. *Design principles and structural innovations.* Recent research has highlighted advancements in modular construction, composite materials, and hydrodynamic optimization. Novel buoy shapes, such as teardrop, turbinate, and top-shaped, have significantly reduced drag forces and improved energy capture efficiency [22–26]. Bio-inspired features, such as water lily shaped stabilizers, have contributed to buoy resilience in dynamic ocean environments.

2. *Energy harvesting and conversion technologies.* Wave energy conversion remains a central focus, with oscillating buoy systems and hybrid

devices incorporating oscillating water columns showing substantial performance improvements. Innovations include multi-degree-of-freedom harvesters, piezoelectric and triboelectric generators, and dual-mode devices that combine wave and tidal energy [15–18; 27–31]. By integrating floating breakwaters with energy converters, hybrid systems also demonstrate cost efficiency and enhanced coastal protection [4–8].

3. *Applications in oceanography, monitoring, and renewable energy.* Buoys are widely used in ocean monitoring, weather forecasting, navigation support, and integration with offshore wind and aquaculture systems [32–36]. Advances in sensor technologies, wireless communication, and self-sustaining power systems have significantly improved data quality and system longevity [33; 36–37].

4. *Challenges, limitations, and environmental considerations.* These include optimizing energy capture in low-energy seas, maintaining operational stability under extreme conditions, reducing system costs, and addressing environmental impacts [28; 38]. The need for robust mooring, reliable data transmission, and sustainable materials is frequently emphasized [32; 37]. Environmental impact assessments remain limited, particularly for large-scale deployments [19– 21].

The key claims and their corresponding evidence strength are summarized in Table 1 to synthesize insights from the reviewed literature. The table categorizes the level of empirical support, ranging from strong evidence validated by multiple studies to areas where the evidence is weak or emerging.

This structured framework clarifies the maturity of research themes and highlights areas that require further validation.

Table 1. Summary of key claims and the strength of supporting evidence

Claim	Evidence Strength	Reasoning	Papers
Hybrid WEC-breakwater systems enhance both energy conversion and wave attenuation	Strong	Multiple experimental and simulation studies showed superior performance over single devices	[1, 3, 10, 12, 22, 23, 25, 30]
Optimized buoy geometry and array configurations significantly improve wave energy capture	Strong	Simulation and laboratory experiments confirmed up to 50% efficiency gains with optimized designs	[2, 17, 21, 39, 49, 50]
Piezoelectric and triboelectric harvesters enable self-powered, autonomous buoy operation	Moderate	Prototypes and field tests demonstrated reliable power for sensors and data transmission	[4, 15, 44]
Modular and eco-friendly buoy designs are feasible and scalable for large deployments	Moderate	Design studies and prototypes demonstrated cost-effectiveness and environmental benefits	[19, 27, 31, 33]
Real-world, long-term performance data for advanced buoy systems is limited	Weak	Most studies are laboratory-based or short-term field trials, and few long-term deployments have been reported	[16, 24, 31, 41, 42]
The environmental impacts of large-scale buoy deployments require further investigation	Weak	Limited research on ecological effects and sustainability at scale	[2, 34, 39, 50]

Source: by Ngoc T. Pham.

3. Discussion

Recent advancements in floating buoy technology have significantly expanded their role in marine energy harvesting, environmental monitoring, and multi-platform hybrid systems. The reviewed literature highlights significant improvements in buoy design optimization, energy harvesting mechanisms, and integration with other marine structures, such as floating breakwaters and offshore wind turbines. These innovations enable buoys to serve as multifunctional platforms for sustainable ocean observation and renewable-energy production.

Despite these achievements, several knowledge gaps remain. Long-term real-world performance data for many advanced buoy systems are

limited. Although informative, laboratory and short-term field trials do not fully capture the operational challenges in harsh and dynamic marine environments. Similarly, the environmental sustainability and scalability of buoy deployments require further research. Modular and eco-friendly designs are promising; however, their ecological impacts and long-term viability for widespread implementation remain untested.

Interdisciplinary collaboration is essential to address these gaps. Future research should prioritize large-scale, long-duration field trials and comprehensive assessments of environmental impacts. The development of adaptive mooring solutions and robust communication networks is critical for improving the reliability and resilience of floating buoy systems under extreme conditions.

To illustrate ongoing efforts in advancing buoy-based observation systems, Figure 3 (adapted from Zhang et al. [50]) presents the conceptual design of the Mooring Buoys Observation System for Benthic with Electro-Optical-Mechanical Cable (MBOSBC).

This hybrid system integrates surface buoys and seafloor nodes through an Electro-Optical-Mechanical (EOM) cable, enabling simultaneous data and power transmission. The surface buoy is powered by wind and solar energy. It communicates via satellite, wireless radio, and acoustic links, whereas the benthic node collects environmental data such as temperature, pressure, salinity, and video imagery. The modularity of the system and its ability to coordinate with other underwater platforms (e.g., AUVs and landers) exemplify a next-generation approach to ocean observation. MBOSBC represents a transitional design that bridges traditional buoy networks and fully cabled observatories, offering enhanced monitoring capa-

bilities with greater deployment flexibility. Floating buoy technology can evolve into an integral component of intelligent, sustainable ocean networks by incorporating hybrid observation platforms and novel energy-harvesting devices. Addressing current limitations through long-term trials and environmental studies and integrating multi-sensor, energy-autonomous systems will pave the way for scalable and eco-friendly solutions in the blue economy.

To further illustrate the state of research coverage and gaps, Table 2 presents a matrix that maps key research topics to five critical study attributes: lab-scale prototypes, field trials, long-term deployments, environmental impact, and hybrid integration.

The table shows that although wave energy conversion has received extensive lab-based study, there is a notable deficiency in real-world validations and environmental research, particularly for sustainable design and long-term deployment.

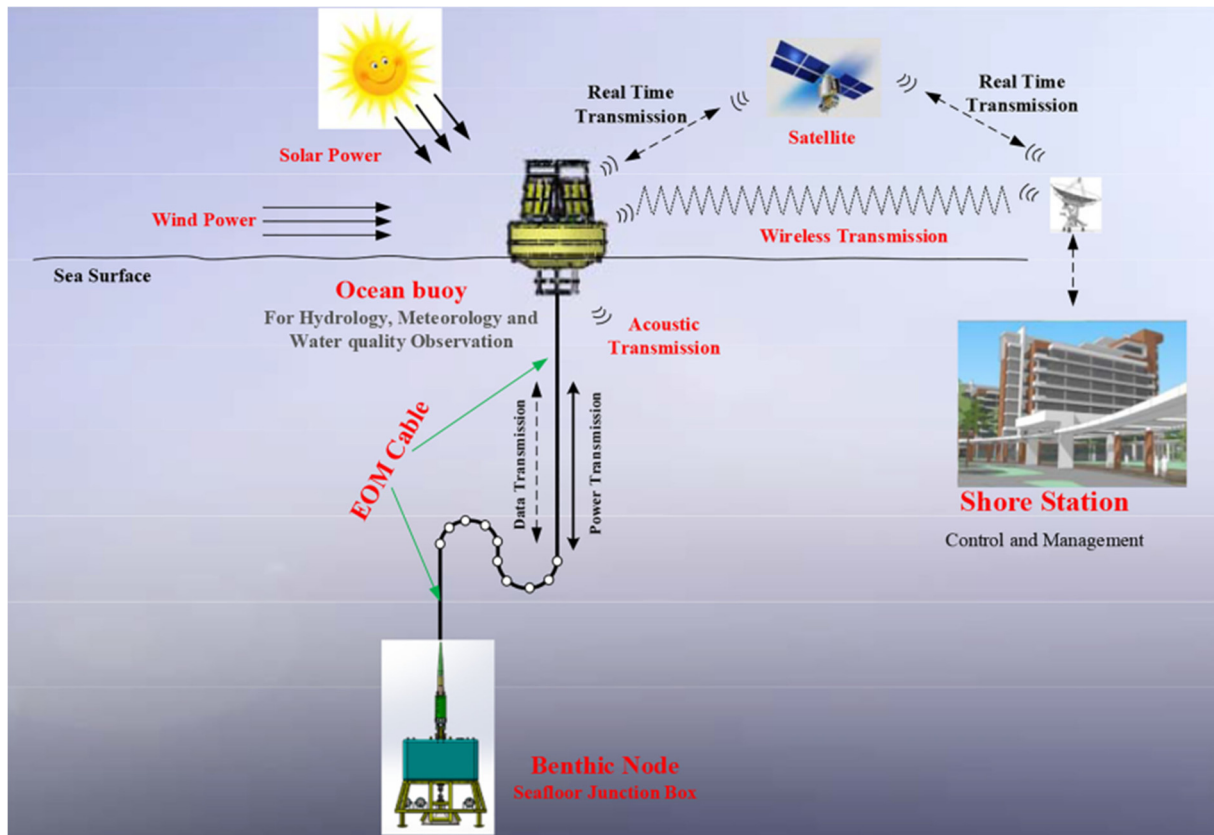


Figure 3. Concept design of mooring buoys observation system

Source: by Ali Azam et al. [50].

Table 2. Research coverage matrix by topic and study attribute

Topic / Attribute	Lab-scale Prototypes	Field Trials	Long-term Deployment	Environmental Impact	Hybrid Systems
Wave Energy Conversion	18	7	3	2	10
Oceanographic Monitoring	8	6	2	3	1
Offshore Wind / Aquaculture	4	2	1	1	2
Power / Data Transmission	5	2	1	1	GAP
Environmental Sustainability	3	1	GAP	2	GAP

Source: by Ngoc T. Pham.

Conclusions

This study reviewed the key innovations, challenges, and future directions in floating buoy technology. Based on this analysis, the following conclusions can be drawn:

1. Floating buoy technology has significantly improved, particularly in marine application design optimization, material engineering, and hybrid system integration.

2. Modular construction, bio-inspired hydrodynamics, and smart sensor integration have improved performance, enabling buoys to operate autonomously under harsh marine conditions.

3. Hybrid systems combining buoys with breakwaters or wind turbines demonstrate strong potential for cost efficiency and energy yield but require further real-world validation.

4. Major challenges remain in the long-term deployment of data, operational reliability under extreme sea states, and insufficient environmental impact assessments.

5. Future research should prioritize scalable designs, interdisciplinary collaboration, and comprehensive ecological assessments to enhance the role of buoys in a sustainable blue economy.

References

- Rozali R, Yusop MM, Khalid P, Dahalan W, Yahaya A, Salih N, Yaakob S. Floating buoy technology for research purposes. *International journal of innovative technology and exploring engineering*. 2019;8(12):5514–5520. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3967.1081219>
- Rozali RH, Mohd Yusop MY, Mohd Dahalan W, Mohamid Salih N, Yaakob SNK, Yahaya AH. Development of floating buoy technology using a modular method. *Advanced Structured Materials*. 2022;167:441–451. http://doi.org/10.1007/978-3-030-89988-2_33

- Du X, Li P, Li Z, Liu X, Wang W, Feng Q, Du L, Yu H, Wang J, Xie X, Tang L. Multi-pillar piezoelectric stack harvests ocean wave energy with oscillating float buoy. *Energy*. 2024;298:131347. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131347> EDN: NFEWKW

- Sun P, Hu Sh, He H, Zhengm S, Chen H, Yang S, Ji Z. Structural optimization on the oscillating-array-buoys for energy-capturing enhancement of a novel floating wave energy converter system. *Energy Conversion and Management*. 2021;228:113693. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113693> EDN: JYVSCF

- Zhang H, Zhou B, Vogel Ch, Willden R, Zang Ju, Zhang L. Hydrodynamic performance of a floating breakwater as an oscillating-buoy type wave energy converter. *Applied Energy*. 2020;257:113996. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113996> EDN: WIHHBS

- Namik H, Stol K. Individual blade pitch control of a spar-buoy floating wind turbine. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2014;22(1):214–223. <http://doi.org/10.1109/TCST.2013.2251636>

- Cheng Y, Du W, Dai S, Ji C, Collu M, Cocard M, Cui L, Yuan Z, Incecik A. Hydrodynamic characteristics of a hybrid oscillating water column-oscillating buoy wave energy converter integrated into a π -type floating breakwater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022; 161:112299. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112299> EDN: ZBRLBK

- Alizzio D, Bonfanti M, Donato N, Faraci C, Grasso GM, Lo Savio F, Montanini R, Quattrocchi A. Design and performance evaluation of a “Fixed-Point” spar buoy equipped with a piezoelectric energy harvesting unit for floating near-shore applications. *Sensors*. 2021;21(5): 1912. <http://doi.org/10.3390/s21051912> EDN: ORCRBL

- Lumpkin R, Özgökmen T, Centurioni L. Advances in the Application of Surface Drifters. *Annual review of marine science*. 2017;9(1):59–81. <http://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060641> EDN: YXMWPX

- Nawaz A, Steele M, Branch R, Burnett D, Liao K, Parker M, Roumeli E. Ecobuoys for scalable oceanography. *Marine Technology Society Journal*. 2025;59(1):36–50. <http://doi.org/10.4031/mts.j.59.1.8> EDN: JDDYQG

- Li D, Dong X, Borthwick A, Sharma S, Wang T, Huang H, Shi H. Two-buoy and single-buoy floating wave

energy converters: A numerical comparison. *Energy*. 2024; 296:131219. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131219> EDN: LPQVUM

12. Wang L, Lin J, Li H, Jiang J, Wu S, Lu G. Achieving efficient power generation for an enclosed drifting buoy by multi-DOF wave energy harvesting. *Ocean Engineering*. 2024;305:117834. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117834> EDN: VURLYX

13. Oikonomou CLG, Gomes RPF, Gato LMC, Falcão AFO. On the dynamics of an array of spar-buoy oscillating water column devices with inter-body mooring connections. *Renewable Energy*. 2020;148:309–325. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.097> EDN: DHRPXZ

14. Sun P, Hongzhou He, Hu Chen, Jun Zhang, Hui Li. Sensitivity analysis of geometric characteristics on the cavity-buoy for energy capture efficiency enhancement of a semi-submersible floating-array-buoy wave energy converter system. *Ocean Engineering*. 2024;294:116735. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116735> EDN: HQETWK

15. Zhang X, Zeng Q, Liu Z. Hydrodynamic Performance of Rectangular Heaving Buoys for an Integrated Floating Breakwater. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019;7(8):239. <http://doi.org/10.3390/JMSE7080239>

16. Cheng Y, Fu L, Dai S, Collu M, Ji C, Yuan Z, Incecik A. Experimental and numerical investigation of WEC-type floating breakwaters: A single-pontoon oscillating buoy and a dual-pontoon oscillating water column. *Coastal Engineering*. 2022;177:104188. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104188> EDN: EVDIRR

17. Zuo H, Zhang J, Bi K, Zhu S, Hao H, Ma R. Structural vibration control of spar-buoy floating offshore wind turbines. *Engineering Structures*. 2023;294:116732. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116732> EDN: VVOHPU

18. Song R, Zhang M, Qian X, Wang X, Dai Y, Chen J. A Floating Ocean Energy Conversion Device and Numerical Study on Buoy Shape and Performance. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2016;4(2):35. <http://doi.org/10.3390/JMSE4020035>

19. Liang G, Wickmann Hanssen FCh, Otto Merz K, Jiang ZH. Numerical analysis of a tethered-buoy mooring system for a prototype floating wind farm. *Wind Energy*. 2024;27(5):500–529. <http://doi.org/10.1002/we.2898> EDN: EIDXTE

20. Azam A, Ahmed A, Li H, Tairab AM, Jia C, Li N, Zhang Z. Design and analysis of the optimal spinning top-shaped buoy for wave energy harvesting in low energy density seas for sustainable marine aquaculture. *Ocean Engineering*. 2022;255:111434. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111434> EDN: VIYGAE

21. Li M, Wu R-k, Wu B-j, Zhang Y-q. Experimental study on conversion efficiency of a floating OWC pentagonal backward bent duct buoy wave energy converter. *China Ocean Engineering*. 2019;33:297–308. <http://doi.org/10.1007/s13344-019-0029-1>

22. Pattanaik B, Vishwanath A, Jalihal P, Rao Y, Karthikeyan A, Sajeev K, Shipin VP. Performance evaluation of power module during demonstration of wave-powered navigational buoy. *Current Science*. 2020;118(11):1712. <http://doi.org/10.18520/cs/v118/i11/1712-1717> EDN: RYCVYU

23. Ma Y, Xie G-j, Liu S, Zhao T, Zhu Y, Zhang X. Hydrodynamic performance investigation of the multi-degree of freedom oscillating-buoy wave energy converter. *Ocean Engineering*. 2023;285:115345. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115345> EDN: DHXLRV

24. Zhang H, Zhou B, Vogel Ch, Willden R, Zang Ju, Geng J. Hydrodynamic performance of a dual-floater hybrid system combining a floating breakwater and an oscillating-buoy type wave energy converter. *Applied Energy*. 2020;259:114212. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114212> EDN: FOAIGA

25. Cui X, Xu J, Pang Sh, Li X, Li H. Design and Implementation of Inductively Coupled Power and Data Transmission for Buoy Systems. *Energies*. 2023;16(11):4417. <http://doi.org/10.3390/en16114417> EDN: QTVWBN

26. Zhao X, Ning D, Zhang Ch, Kang H. Hydrodynamic Investigation of an oscillating buoy wave energy converter integrated into a pile-restrained floating breakwater. *Energies*. 2017;10(5):712. <http://doi.org/10.3390/EN10050712>

27. Cheng Y, Song F, Fu L, Dai S, Yuan Z, Incecik A. Experimental investigation of a dual-pontoon WEC-type breakwater with a hydraulic-pneumatic complementary power take-off system. *Energy*. 2023;286:129427. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129427> EDN: IIRMYR

28. Jalani MA, Saad MR, Naiem MAM, Abidin NZ, Razali MN, Halim MH, Sulaiman MS, Rahman MRA, Imai Y. Optimization of a hybrid backward bent duct buoy with point absorber based on kuantan harbor ocean characteristics. *Transactions on Maritime Science*. 2025;14(1):1–19. <http://doi.org/10.7225/toms.v14.n01.006> EDN: ILTZLA

29. Chen F, Wang X, Li Q, Chen D, Gao Z, Lai J, Cai K. Design and research of dual-mode power generation device based on improved oscillating buoy. *Energies*. 2024;17(22):5616. <http://doi.org/10.3390/en17225616> EDN: CAFDRW

30. Jin H, Zhang H, Xu D. Array buoys with non-linear stiffness enhance low-frequency wave attenuation and energy capture. *Physics of Fluids*. 2022;34:127106. <http://doi.org/10.1063/5.0123247> EDN: WPHDWL

31. Chen Sh, Zhang J, Liu Sh, Tao B, Wu Y, Wan X, Xu Y, Song M, Yan X, Yang X, Lei Z. Structure design and implementation of a high stability semi-submersible optical buoy for marine environment observation. *Ocean Engineering*. 2023;290:116217. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116217> EDN: QLRTKX

32. Zhao D, Li Sh, Shi W, Zhou Zh, Guo F. Design and optimization of the teardrop buoy driven by ocean thermal energy. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(4):661. <http://doi.org/10.3390/jmse12040661> EDN: AVZJCF

33. Chen H, Yin F, Huang W, Liu M, Li D. Ocean surface drifting buoy system based on UAV-enabled wireless powered relay network. *Sensors*. 2020;20(9):2598. <http://doi.org/10.3390/s20092598> EDN: VUJXUA
34. Giorgi G, Gomes RPF, Henriques JCC, Gato LMC, Bracco G, Mattiazzo G. Detecting parametric resonance in a floating oscillating water column device for wave energy conversion: Numerical simulations and validation with physical model tests. *Applied Energy*. 2020;276:115421. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115421> EDN: FZVAFL
35. Yaakob Y, Basri MHM, Bardzan MF, Ismail NI, Razak AA, Pahmi MAAH. The stability analysis of floating buoy as a wave energy harvester for Malaysian coastal area. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*. 2022;96(1):1–6. <http://doi.org/10.37934/aram.96.1.16> EDN: WHRIBC
36. Liu Z, Zhang X, Xu Ch. Experimental study on a back-bent duct buoy oscillating water column device in various degrees of freedom. *Renewable Energy*. 2024;224:120121. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120121> EDN: GVQAU
37. Leimeister M, Kolios A, Collu M, Thomas Ph. Design optimization of the OC3 phase IV floating spar-buoy, based on global limit states. *Ocean Engineering*. 2020;202:107186. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107186> EDN: YLORGN
38. Zhu Ch, Wu M, Liu Ch, Xiang Ch, Xu R, Yang H, Wang Z, Wang Z, Xu P, Xing F, Wang H, Xu M. Highly integrated triboelectric — electromagnetic wave energy harvester toward self-powered marine buoy. *Advanced Energy Materials*. 2023;13(37):2301665. <http://doi.org/10.1002/aenm.202301665> EDN: PDOEMY
39. Mozgovaya MN, Bychkov SN, Kostylev KA. The deploying buoying system design in a stationary flow as a part of a medium-frequency hydro-acoustic complex and its characteristics research. *Russian Journal of Water Transport*. 2020;(64):79–88. <http://doi.org/10.37890/jwt.vi64.99> EDN: QKYZUW
40. Ladd CJT, Vovides AG, Schwarz Ch, Wimpler MCh, Balke T. Monitoring tides, currents, and waves along coastal habitats using the Mini Buoy. *Limnology and Oceanography: Methods*. 2024;22(9):619–699. <http://doi.org/10.1002/lom3.10631> EDN: IZIACH
41. Garnaud X, Mei C. Wave-power extraction by a compact array of buoys. *Journal of Fluid Mechanics*. 2009;635:389–413. <http://doi.org/10.1017/S0022112009007411>
42. Zheng X, Ji M, Jing F, Lu Y, Zheng W, Zhou Sh, Li X, Yan H. Sea trial test on offshore integration of an oscillating buoy wave energy device and floating breakwater. *Energy Conversion and Management*. 2022;256:115375. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115375> EDN: ODNLFZ
43. Gao C, Liu Z, Shen T, Cheng Z, Chen F, Liu S, Jiang L, Dong Z. Water lily-inspired notch for passive stabilization in floating devices. *Device*. 2024;2(7):100405. <http://doi.org/10.1016/j.device.2024.100405> EDN: YWNTJL
44. Homayoun E, Ghassemi H, Ghafari H. Power performance of the combined monopile wind turbine and floating buoy with heave-type wave energy converter. *Polish Maritime Research*. 2024;294:116735. <http://doi.org/10.2478/pomr-2019-0051>
45. Zhao Yu, Fan Zh, Bi Ch, Wang H, Mi J, Xu M. On hydrodynamic and electrical characteristics of a self-powered triboelectric nanogenerator based buoy under water ripples. *Applied Energy*. 2022;308:118323. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118323> EDN: BEJLYG
46. Boo SY, Shelley SA. Design and analysis of a mooring buoy for a floating arrayed WEC platform. *Processes*. 2021;9(8):1390. <http://doi.org/10.3390/pr9081390> EDN: MWDVGI
47. Shi H, Dong X, Feng L, Han Z. Experimental study on the hydrodynamic performance of a heaving buoy assembled on a net cage platform. *Journal of Ocean University of China*. 2019;18:1031–1040. <http://doi.org/10.1007/s11802-019-4028-x> EDN: HIEKLJ
48. Alshmeel GHA, Al-Doori ASB, Ahmed SR, Abraham ZA, Ghaffoori A, Hussain A-ST. Self-sustaining buoy system: Harnessing water wave energy for smart, wireless sensing and data transmission. *AICCONF '24. Proceedings of the Cognitive Models and Artificial Intelligence Conference; 2024 May 25–26; Istanbul Turkiye*. New York, NY, United States; Association for Computing Machinery; 2024. p. 349–356. <http://doi.org/10.1145/3660853.3660940>
49. Cheng Y, Fu L, Dai S, Collu M, Cui L, Yuan Z, Incecik A. Experimental and numerical analysis of a hybrid WEC-breakwater system combining an oscillating water column and an oscillating buoy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;169:112909. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112909> EDN: IOXEJY
50. Azam A, Ahmed A, Yi M, Zhang Z, Tan X, Ali A, Li N. A self-stabilizing point absorber wave energy converter with a top-shaped buoy and non-linear power take-off for oceanographic applications. *Ocean Engineering*. 2023;288:116018. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116018> EDN QHNPIM

About the author

Ngoc T. Pham, Doctor of Civil Engineering, Lecturer, Faculty of Civil Engineering, Thuyloi University, 175 Tay Son, Dong Da St, Ha Noi, Vietnam; ORCID: 0000-0002-4928-6236; e-mail: thinhtls@tlu.edu.vn

Сведения об авторе

Фам Нгок Тхинь, доктор технических наук, преподаватель, факультет гражданского строительства, Университет Туйлой, Вьетнам, Ханой, Вьетнам, ул. Тай Сон, Донг Да, 175; ORCID: 0000-0002-4928-6236; e-mail: thinhtls@tlu.edu.vn