

ISSN 1813-8225 (Print)
ISSN 2541-7541 (Online)

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

2026

№ 2 (198)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издаётся с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 2 (198) 2026

УЧРЕДИТЕЛИ:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Омский государственный
технический университет»

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Омский государственный
университет путей сообщения»

Свидетельство о регистрации
ПИ № ТУ55-00559 от 06.10.2017 г.
выдано Управлением Роскомнадзора
по Омской области

Сайт журнала:
<https://onv.omgtu.ru>

Страница журнала на сайте учредителя:
[http://www.omgtu.ru/
general_information/media_omgtu/
journal_of_oms_k_research_journal/](http://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_oms_k_research_journal/)

Подписной индекс
в каталоге Роспечать 83597

Ответственный секретарь
Н. В. Кенжакина

Редактор
Т. П. Семина

Компьютерная верстка
О. Н. Чирун

Макет обложки
В. С. Гуринов

© Редакция журнала
«Омский научный вестник», ОмГТУ

Подписано в печать 25.06.2026 г.
Дата выхода в свет 30.06.2026 г.

Формат 60x84 1/8.
16,04 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 58
Цена свободная

© ФГАОВ О «Омский
государственный технический
университет», 2026

Право на оригинал-макет
и оформление
принадлежит
учредителю журнала,
авторское право
на статьи — авторам

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

КРОПОТИН Олег Витальевич, главный редактор, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ОВЧАРЕНКО Сергей Михайлович, д. т. н., профессор,
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

ГАЛИЕВ Ильхам Исламович, д. т. н., профессор,
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

АВДЕЕВА Диана Константиновна, д. т. н., профессор,
Томский политехнический университет, г. Томск

АЮШЕЕВ Тумэн Владимирович, д. т. н., доцент,
Восточно-Сибирский университет технологий и управления, г. Улан-Удэ

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

БУБНОВ Алексей Владимирович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ВАВИЛОВ Владимир Платонович, д. т. н., профессор,
Томский политехнический университет, г. Томск

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ГРАДОБОЕВ Александр Васильевич, д. т. н., профессор,
Томский политехнический университет, г. Томск

КАРПОВ Валерий Васильевич, д. э. н., профессор,
Омский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Омск

КОЗЛОВ Александр Геннадьевич, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

КОНОПАЦКИЙ Евгений Викторович, д. т. н., профессор,
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, д. т. н., профессор,
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

ЛИ Вэймин, доктор, профессор,
Ляонинский научно-технологический институт (АНТИ), Бэньси, Китай

МАЙСТРЕНКО Василий Андреевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

МЭН Чжаоцзюнь, доктор, профессор,
Ляонинский научно-технологический институт (АНТИ), Бэньси, Китай

НАУМЕНКО Александр Петрович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

НОВИКОВ Алексей Алексеевич, д. т. н.,
Омский государственный технический университет, г. Омск

НОВОЖИЛОВ Александр Николаевич, д. т. н., профессор,
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова,
г. Павлодар, Республика Казахстан

ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич, д. т. н.,
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

ПАНИН Сергей Викторович, член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор,
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

ПАНЧУК Константин Леонидович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ПОЛЕЩЕНКО Константин Николаевич, д. т. н., профессор,
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск

ПОЛИЩУК Владимир Иосифович, д. т. н., профессор,
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул

ПОПОВ Андрей Юрьевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

РАУБА Александр Александрович, д. т. н., профессор,
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

РОТКОВ Сергей Игоревич, д. т. н., профессор,
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Нижний Новгород

СУШКОВ Валерий Валентинович, д. т. н., профессор,
Нижевартовский государственный университет, г. Нижневартовск

СЫЗРАНЦЕВ Владимир Николаевич, д. т. н., профессор,
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ТОЛОК Алексей Вячеславович, д. т. н., профессор,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич, к. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ХУАН Чжидун, доктор, профессор,
Ляонинский научно-технологический институт (АНТИ), Бэньси, Китай

ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ШАЛАЙ Виктор Владимирович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ЩЕРБА Виктор Евгеньевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

ЮРКОВ Виктор Юрьевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный педагогический университет, г. Омск

ЯКОВАЕВА Елена Владимировна, д. э. н., доцент,
Омский государственный технический университет, г. Омск



OMSK SCIENTIFIC BULLETIN

Published Since October 1997.
Published 4 times a year

№ 2 (198) 2026

FOUNDERS

Federal State
Autonomous Educational Institution
of Higher Education
«Omsk State Technical University»

Federal State Budgetary
Educational Institution
of Higher Education «Omsk State
Transport University»

Identification number
of registered Mass Media
ПМ № ТУ55-00559 from 06.10.2017
issued by the Federal Service for
Supervision of Communications,
Information Technology,
and Mass Media, Omsk region

Journal Website:
<https://onv.omgtu.ru>

Journal Page on Founder's Website:
[http://www.omgtu.ru/
general_information/media_omgtu/
journal_of_oms_k_research_journal/](http://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_oms_k_research_journal/)

Subscription Index
in Federal Agency on Press and Mass
Communications Catalog 83597

Executive Secretary
N. V. Kenzhalinova

Editor
T. P. Semina

Computer Page-Proofs
O. N. Chirun

Cover Layout
V. S. Gurinov

© Editorial Board of
«Omsk Scientific Bulletin»,
OmSTU

Signed in Print 25.06.2026
Date of Publication 30.06.2026

Format 60x84 1/8.
Conventional
Printed Sheets 06.04
Offset Paper

Printed on a Duplicator
at Scientific Publishing Office,
Omsk State Technical University

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100).
Order 58
Open Price

© Omsk State
Technical University, 2026

The right to the original
layout and design belongs
to the founder
of the journal,
the right of the authorship
to the articles belongs
to the authors

EDITORIAL BOARD

KROPOTIN Oleg Vitalyevich (Chief Editor), D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

OVCHARENKO Sergey Mikhaylovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

GALIEV Ilkham Islamovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

AVDEEVA Diana Konstantinovna, D. Sc. (Technical), Professor,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

AUSHEEV Tumen Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

BIRYUKOV Sergey Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

BUBNOV Aleksey Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

VAVILOV Vladimir Platonovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

GORYUNOV Vladimir Nikolaevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

GRADOBOEV Alexander Vasilievich, D. Sc. (Technical), Professor,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

KARPOV Valeriy Vasilyevich, D. Sc. (Economic), Professor,
Omsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Omsk, Russia

KOZLOV Aleksandr Gennadyevich, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

KONOPATSKIY Evgeniy Viktorovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod

KUZNETSOV Andrey Albertovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

LI Weimin, Doctor, Professor,
Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China

MAYSTRENKO Vasily Andreevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

MENG Zhaojun, Doctor, Professor,
Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China

NAUMENKO Alexander Petrovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

NOVIKOV Alexey Alexeevich, D. Sc. (Technical),
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

NOVOZHILOV Aleksandr Nikolayevich, D. Sc. (Technical), Professor,
S.Toraighyrov Pavlodar State University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

OSIPOV Dmitry Sergeevich, D. Sc. (Technical),
Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

PANIN Sergey Viktorovich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
D. Sc. (Technical), Professor, Institute of Strength Physics and Materials Science,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk

PANCHUK Konstantin Leonidovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

POLESHCHENKO Konstantin Nikolayevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

POLISHCHUK Vladimir Iosifovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

POPOV Andrey Yuryevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

RAUBA Alexander Aleksandrovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

ROTKOV Sergey Igorevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia

SUSHKOV Valery Valentinovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia

SYZRANTSEV Vladimir Nikolaevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

TATEVOSYAN Andrey Alexandrovich, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

TOLOK Aleksey Vyacheslavovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

FEDOROV Alexey Arkadievich, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

KHARLAMOV Victor Vasilievich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

KHATSEVSKIY Konstantin Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

HUANG Zhidong, Doctor, Professor,
Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China

CHERNYAVSKY Dmitry Ivanovich, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

SHALAY Viktor Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

SCHERBA Victor Evgenievich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

YURKOV Viktor Yuryevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russia

YAKOVLEVA Elena Vladimirovna, D. Sc. (Economic), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

В. Г. Хомченко, Е. Г. Холкин. Кинематический синтез, анализ и условия передачи движения в кривошипных безмуфтовых прессах в холостом режиме работы	5
Ю. В. Кузнецов, С. П. Гнатюк, П. О. Яковлев. Смысл и метрики «значения тона» в технологии и стандартах печати	13
Т. В. Казанцева, Н. К. Казанцева, М. А. Полякова, В. А. Александров, Е. О. Параскивая. Количественная оценка уровня соответствия назначенных ключевых слов содержанию стандарта	22
Ю. Д. Маркина. Алгоритм оценки ветровой нагрузки на рабочие площадки антенно-мачтовых сооружений в условиях цифровизации расчётов	32
Ю. О. Бредгауэр, А. А. Федоров, Д. А. Полонянкин. Исследование гранулометрического состава и морфологии частиц шлама в контексте образования мостиков сварки при электроэрозионной обработке штамповой стали	40
Д. Ф. Ахунов, М. Н. Семенов, А. Р. Мухаметзянов. Плазменно-жидкостная сварка латунных пластин	49
Н. Ю. Капалин, О. О. Бердников, Д. С. Реченко. Физика и технология лазерной обработки металлов: анализ режимов обработки стали 12X18H10T	56
М. Ф. Моргунов. Метод прецедентного прогнозирования свойств частей изделий авиационной техники	64

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. Г. Люtareвич, В. А. Ткаченко, Д. В. Бетев. Алгоритм расчёта параметров молниезащиты объектов энергетики	71
К. С. Мочалин, Ю. М. Денчик, А. И. Антонов, Д. Ю. Руди, А. А. Руппель. Проблема возникновения кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех в электроэнергетике	79
М. В. Охотников, Ф. Р. Исмаилов, В. Е. Вавилов. Критерии применения ротора в интегрированном стартер-генераторе	88

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

М. И. Гильдебрандт, Л. Б. Серкова. Разработка конструкции устройства для контроля увлажнения грунта в пространстве	96
А. С. Курзаков. Формирование и исследование модели ступенчатого газового слоя для применения в опорах измерительного и диагностического оборудования	102
Е. В. Леун. Физико-технические основы совершенствования контактных измерительных головок для координатных измерительных машин на основе волоконных датчиков	112
Д. Н. Клыпин. Комбинированные датчики биологических сигналов	122
С. В. Мацевич, А. В. Тимошенко, В. А. Козырев, Г. М. Зюзин, А. В. Мацевич. Когнитивно-графический интерфейс рабочего места диспетчера ситуационного центра агропромышленного предприятия	130

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

V. G. Khomchenko, E. G. Kholkin. Kinematic synthesis, analysis and conditions of the motion transmission in clutch-free presses at the idle mode	5
Yu. V. Kuznetsov, S. P. Gnatyuk, P. O. Yakovlev. Meaning and metrics of the "tone value" in printing technology and standards	13
T. V. Kazantseva, N. K. Kazantseva, M. A. Polyakova, V. A. Alexandrov, E. O. Paraskivaya. Quantitative assessment of the conformity level of officially assigned keywords to the standard content	22
Ju. D. Markina. Algorithm for assessing wind loads on working platforms of antenna-mast structures under conditions of digitalized engineering analysis	32
Iu. O. Bredgauer, A. A. Fedorov, D. A. Polonyankin. Investigation of granulometric composition and morphology of debris particles in the context of welding bridge formation at electrical discharge machining of the stamped steel	40
D. F. Akhunov, M. N. Semenov, A. R. Mukhametzyanov. Plasma-liquid welding of brass plates	49
N. Yu. Kapalin, O. O. Berdnikov, D. S. Rechenko. Physics and technology of the laser metal processing: Analysis of processing modes of the 12X18H10T steel	56
M. F. Morgunov. Precedent-based method for predicting the features of aviation components	64

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

A. G. Lyutarevich, V. A. Tkachenko, D. V. Betev. Calculation algorithm for lightning protection parameters of energy facilities	71
K. S. Mochalin, Yu. M. Denchik, A. I. Antonov, D. Yu. Rudi, A. A. Ruppel. Problem of emerging the conductive low-frequency electromagnetic interference in the electric power industry	79
M. V. Okhotnikov, F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov. Criteria of using a rotor in an integrated starter-generator	88

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND CONNECTION

M. I. Gildebrandt, L. B. Serkova. Development of the device for monitoring soil moisture in space	96
A. S. Kurzakov. Formation and investigation of a stepped gas-layer model in measuring and diagnostic equipment supports	102
E. V. Leun. Physical and technical principles of improving contact measuring heads for coordinate measuring machines based on fiber sensors	112
D. N. Klypin. Combined biosensors	122
S. V. Matseevich, A. V. Timoshenko, V. A. Kozyrev, G. A. Zyuzin, A. V. Matseevich. Cognitive graphical interface of the dispatcher workplace of the situational center in the agro-industrial enterprise	130

УДК/UDC 621.01:621.77.06

DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-5-12>

EDN: YLDVPG

Научная статья/Original article

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ, АНАЛИЗ И УСЛОВИЯ ПЕРЕДАЧИ ДВИЖЕНИЯ В КРИВОШИПНЫХ БЕЗМУФТОВЫХ ПРЕССАХ В ХОЛОСТОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

В. Г. Хомченко, Е. Г. Холкин 

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

 holkin555@mail.ru

В статье предложен уточненный двухэтапный метод синтеза рычажного механизма третьего класса для реализации холостого режима работы безмуфтового механического пресса, гарантирующий сборку этого механизма при полном угле поворота входного кривошипа.

На первом этапе с использованием условного четырехзвенника и вспомогательной системы координат определяется верхнее предельное положение ползуна, занимаемое им в холостом режиме работы пресса, а также находятся расположения направляющей ползуна и оси ординат основной системы координат. Второй этап синтеза ведется в соответствии с методами проектирования механизмов с приближенным выстоем на основе использования их предельных положений. Для оценки величины малых перемещений (колебаний) ползуна в холостом режиме работы пресса и условий передачи движений получены аналитические зависимости, позволяющие численными методами рассчитывать функции положения механизма и угла давления в нем.

Приведен пример, подтвердивший возможность реализации холостого режима работы механического безмуфтового пресса рычажным механизмом третьего класса при тех же параметрах, что приняты при его синтезе для рабочего режима. Подтверждена возможность получения незначительных колебаний рабочего ползуна в холостом режиме работы пресса и приемлемых для этого режимов углов давления.

Ключевые слова: безмуфтовый механический пресс, рычажный механизм третьего класса, холостой режим работы пресса, кинематический синтез и анализ механизма, функция перемещения, угол давления

Для цитирования: Хомченко В. Г., Холкин Е. Г. Кинематический синтез и анализ и условия передачи движения в кривошипных безмуфтовых прессах в холостом режиме работы. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 5–12. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-5-12>. EDN: YLDVPG.



© Хомченко В. Г., Холкин Е. Г., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

KINEMATIC SYNTHESIS, ANALYSIS AND CONDITIONS OF THE MOTION TRANSMISSION IN CLUTCH-FREE PRESSES AT THE IDLE MODE

V. G. Khomchenko, E. G. Kholkin 

Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

 holkin555@mail.ru

The article proposes a refined two-stage method for synthesizing a third-class lever mechanism for the implementation of the idle operation of a clutch-free mechanical press, which guarantees the assembly of this mechanism at full angle of rotation of the input crank.

The first stage determines the upper extreme position of the slider occupied during the press idle stroke, using a conditional four-bar linkage and an auxiliary coordinate system and also locations of the slider guide and the ordinate axes of the main coordinate system are found. The second stage of synthesis is conducted in accordance with design methods for mechanisms with an approximate dwell, based on the utilization of their extreme positions. The authors derive analytical relations to evaluate the magnitude of small displacements (oscillations) of the slider during the press idle stroke and the conditions of motion transmission.

Moreover, the authors demonstrate the example that confirms the possibility of implementing the idle mode of operation of a mechanical non-clutch press with a third-class lever mechanism of the same parameters assuming its synthesis for the operating mode. The research demonstrates the possibility of obtaining minor fluctuations of the working slider in the idle mode of the press and also presents acceptable pressure angle modes.

Keywords: clutch-free mechanical press, lever mechanism of the third class, idle mode of operation of the press, kinematic synthesis and analysis of the mechanism, displacement function, pressure angle

For citation: Khomchenko V. G., Kholkin E. G. Kinematic synthesis, analysis and conditions of the motion transmission in clutch-free presses at the idle mode. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):5–12. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-5-12>. EDN: YLDVPG. (In Russ.).



© Khomchenko V. G., Kholkin E. G., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Кривошипные кузнечно-прессовые машины получили широкое распространение в промышленности благодаря своим преимуществам перед другим оборудованием подобного назначения¹. К одним из основных преимуществ можно отнести их высокую производительность, недоступную для прессов другого принципа работы, в частности, гидравлических и винтовых² [1, 2]. В применяемых в настоящее время кривошипных прессах процесс их включения/выключения реализуется с помощью фрикционных систем «муфта – тормоз», управляемых, как правило, пневмоприводом того или иного типа [3–5]. Наличие фрикционного контакта в таких системах приводит к ряду негативных последствий как

экологического характера, так и технического: к снижению надежности процесса включения/выключения, интенсивному износу контактируемых поверхностей муфт и тормозов и к необходимости их частого ремонта [6–9].

В настоящее время ведутся поиски конструкций кривошипных прессов, в которых исключается применение фрикционных муфт и тормозов [5, 9–13]. К недостаткам устройств включения/выключения безмуфтовых прессов можно отнести малую надежность, особенно проявляющуюся при передаче больших усилий^{3, 4, 5}. Указанные недостатки удастся исключить путем применения рычажного механизма третьего класса по классификации Ассура – Артоболевского в кривошипном безмуфтовом прессе⁶,

¹ Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Т. 4. Машины и оборудование кузнечно-штамповочного и литейного производства / под ред. Ю. А. Бочарова, И. В. Матвеевко. Москва: Машиностроение, 2005. 926 с.

² Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике // Справочное пособие для инженеров, конструкторов и изобретателей: в 7 томах. Т. 2: Кулиснорычажные и кривошипно-ползунные механизмы. 2-е изд., перераб. Москва: Наука, 1979. 560 с.

³ Пат. 2219059 С2 Российская Федерация, МПК В 30 В 1/26. Механизм переменной структуры с комбинированным шатуном механического пресса / Невенчанная Т. О., Хохлова О. А., Пазенко В. Т. № 2002100996/02; заявл. 08.01.02; опубл. 20.12.03.

⁴ Пат. 2217314 С2 Российская Федерация, МПК В 30 В 1/26, В 30 В 15/14. Механический пресс / Кожевников В. А., Резников В. И. № 2001118905/02; заявл. 06.07.01; опубл. 27.11.03.

⁵ Авторское свидетельство SU 1774921 СССР, МПК В 30 В 15/14, В 30 В 15/00. Безмуфтовый механический пресс / Абдраимов С., Турсунов К. Д., Кельдибеков А. К. № 1484760; заявл. 15.02.91; опубл. 07.11.92.

⁶ Пат. 2752399 С1 Российская Федерация, МПК В 30 В 1/26, В 30 В 15/14. Безмуфтовый механический пресс / Хомченко В. Г. № 2020139803; заявл. 04.12.20; опубл. 27.07.21.

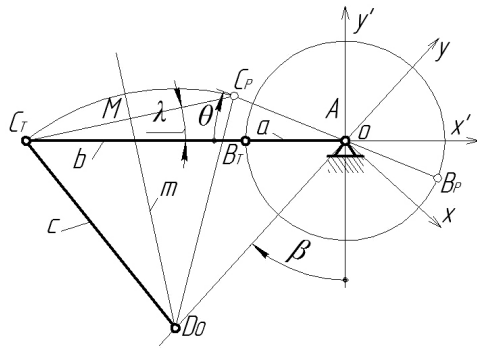


Рис. 1. Условный четырехзвенный механизм $ABCD_0$
Fig. 1. $ABCD_0$ conditional four-bar mechanism
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

в котором процесс включения/выключения реализуется с использованием той или иной рычажной системы, приводимой в движение отдельным электроприводом (в некоторых случаях для этого можно использовать и пневмопривод).

Методы синтеза рычажного механизма для рабочего и холостого режимов работы кривошипного безмуфтового пресса⁷ рассмотрены в статье [14].

В данной статье предлагаются уточненный метод синтеза рычажного механизма третьего класса безмуфтового пресса в холостом режиме работы и аналитические зависимости для расчета положений выходного звена механизма и для определения условий передачи движения в нем, необходимые для последующего оптимизационного и динамического синтеза таких механизмов.

Кинематический синтез безмуфтового пресса для холостого режима работы

В статье [14] был предложен один из возможных вариантов синтеза безмуфтового пресса на основе рычажного механизма третьего класса для холостого режима его работы, в котором в качестве свободного параметра синтеза выступало крайнее верхнее положение выходного ползуна, занимаемое им в режиме приближенного выстоя. Такой порядок синтеза не всегда обеспечивал работоспособность механизма в связи с возможным появлением проблем его сборки в некоторых положениях. Это обстоятельство приводило к необходимости дополнительных предварительных исследований механизма.

В данной работе предлагается метод кинематического синтеза рычажного механизма третьего класса, гарантирующий его сборку при полном обороте кривошипа в холостом (выключенном) режиме работы пресса.

Кинематический синтез механизма рассматриваемого пресса для холостого режима его работы совпадает в целом с порядком синтеза рычажных механизмов с приближенным выстоем по заданной циклограмме [15]. Однако полное отсутствие интервалов движения в холостом режиме безмуфтового пресса приводит к некоторым особенностям проектирования его кинематической схемы. В соответствии с предлагаемым подходом синтез схемы

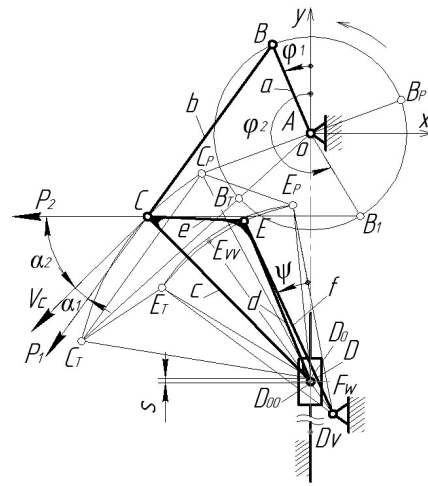


Рис. 2. Рычажный механизм третьего класса в холостом режиме работы пресса $ABCEDF_w$
Fig. 2. Third-class lever mechanism in the idle mode of the $ABCEDF_w$ press operation
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

механизма третьего класса для холостого режима работы безмуфтового пресса ведется в две стадии.

Первая стадия проектирования заключается в расчете координат x_{d01} и y_{d01} верхнего крайнего положения D_0 выходного рабочего звена D вначале во вспомогательной системе координат $Ox'y'$ (рис. 1), а затем в основной — Oxy (рис. 2). Для определения названных координат во вспомогательной системе $Ox'y'$ будем использовать условный четырехзвенник $ABCD_0$ (рис. 1), выделенный из основного механизма третьего класса $ABCEDF_w$ (рис. 2) в положениях $AB_pC_pD_0$ и $AB_TCT_0D_0$, соответствующих верхнему предельному положению D_0 звена D . Полученный таким образом условный четырехзвенник $ABCD_0$ проектируется по заданному углу асимметрии циклограммы⁸ θ и относительным длинам b и c шатунов соответственно BC и CD (в качестве звена единичной длины принята длина a кривошипа AB). Отметим, что треугольный шатун CED (рис. 2) в условном четырехзвеннике $ABCD_0$ (рис. 1) играет роль коромысла CD_0 .

При назначенных в процессе кинематического синтеза шестизвенного рычажного механизма $ABCEDF$ для рабочего режима пресса в кинематических параметрах [14, 15] (рис. 2) угол асимметрии циклограммы θ является единственным свободным параметром в ходе его проектирования для холостого режима.

При комплексном оптимизационном кинематическом и динамическом проектировании данного шестизвенного механизма третьего класса для рабочего и холостого режимов полное число свободных параметров будет равно шести: относительные кинематические размеры b , c , e , d и f соответственно шатуна BC , сторон CE , CD и ED треугольного шатуна CED и исполнительного управляющего звена EF_w и угол асимметрии циклограммы θ .

⁷ Пат. 2752399 С1 Российская Федерация, МПК В 30 В 1/26, В 30 В 15/14. Безмуфтовый механический пресс.

⁸ Артоболевский И. И., Левитский Н. И., Черкудинов С. А. Синтез плоских механизмов. Москва: Физматгиз, 1959. 1084 с.

По заданным значениям параметров b , c и θ найдем координаты $xct1$, $yct1$ и $xcp1$, $ycp1$ центра шарнира C в его крайних положениях C_T и C_p во вспомогательной системе координат $Ox'y'$, ось абсцисс которой совпадает с линией AC_T , соответствующей наиболее удаленному от точки A положению шарнира C (рис. 1):

$$xct1 = -(1 + b); yct1 = 0;$$

$$xcp1 = (b - 1) \cdot \cos(\pi + \theta);$$

$$ycp1 = (b - 1) \cdot \sin(\pi + \theta).$$

В соответствии с принятым значением относительной длины s стороны CD треугольного шатуна CED найдем координаты $xdo1$ и $ydo1$ верхнего предельного положения D_0 выходного ползуна D во вспомогательной системе координат $Ox'y'$ как неподвижной точки условного четырехзвенника $ABCD_0$, у которого расстояние AD_0 является межцентровым расстоянием. Координаты $xdo1$ и $ydo1$ рассчитываются как координаты точки D_0 отрезка MD_0 линии, перпендикулярной хорде $C_T C_p$, восстановленной из ее середины (рис. 1):

$$xdo1 = xm + m \cdot \sin(\lambda); ydo1 = ym - m \cdot \cos(\lambda),$$

$$\text{где } xm = 0,5 \cdot (xct1 + xcp1); ym = 0,5 \cdot (yct1 + ycp1);$$

$$m = (c^2 - 0,25 \cdot ((xcp1 - xct1)^2 + ycp1^2))^{0,5};$$

$$\lambda = \arctg(k); k = (ycp1 - yct1)/(xcp1 - xct1).$$

Полученная в результате такой последовательности действий линия AD_0 должна быть принята, во-первых, за осевую линию направляющей рабочего ползуна D , а во-вторых, за линию, совпадающую с осью Oy основной системы координат Oxy механизма (рис. 2), в которой должны выполняться все исследования свойств этого механизма.

Пересчитаем ранее полученные координаты точек C_T , C_p и D_0 , необходимые для дальнейшего синтеза механизма, в его основную систему координат Oxy , определив вначале угол β между осями абсцисс Ox' и Ox вспомогательной и основной систем координат соответственно (рис. 1) (на рис. 1 данный угол показан между осями ординат используемых систем координат):

$$\beta = 0,5 \cdot \pi - \arctg(ydo1/xdo1).$$

$$xct = xct1 \cdot \cos(\beta) + yct1 \cdot \sin(\beta);$$

$$yct = -xct1 \cdot \sin(\beta) + yct1 \cdot \cos(\beta);$$

$$xcp = xcp1 \cdot \cos(\beta) + ycp1 \cdot \sin(\beta);$$

$$ycp = -xcp1 \cdot \sin(\beta) + ycp1 \cdot \cos(\beta);$$

$$xdo = 0; ydo = -xdo1 \cdot \sin(\beta) + ydo1 \cdot \cos(\beta). (1)$$

Значение xdo , равное нулю, объясняется тем, что ось Oy основной системы координат при принятом порядке синтеза механизма в холостом режиме должна проходить через точку D_0 .

Вторая стадия кинематического синтеза шести-звенного механизма для холостого режима работы пресса выполняется в полученной основной системе координат Oxy (рис. 2).

Определим в основной системе координат Oxy координаты xet , yet и xep , yep точек E_T и E_p (рис. 2), соответствующие предельным положениям треугольного шатуна CED из решения двух систем с уравнениями двух окружностей радиусами e и d и с центрами в точках C_T , C_p и D_0 , а именно:

$$(xet - xct)^2 + (yet - yct)^2 = e^2,$$

$$(xet - xdo)^2 + (yet - ydo)^2 = d^2;$$

$$(xep - xct)^2 + (yep - yct)^2 = e^2,$$

$$(xep - xdo)^2 + (yep - ydo)^2 = d^2.$$

Тогда после необходимых преобразований координаты точки E_T для принятой конфигурации механизма (точка C находится слева от прямой DE) рассчитываются по формулам:

$$yet = k4/2 + ((k4/2)^2 - k5)^{0,5};$$

$$xet = -(d^2 - yet^2 + 2 \cdot yet \cdot ydo - xct^2)^{0,5},$$

$$\text{где } k5 = (k1^2 - 4 \cdot (xct^2 \cdot d^2 + xct^2 \cdot ydo^2)/4(k2 + ydo^2));$$

$$k4 = (2 \cdot xct^2 \cdot ydo - k3)/(k2 + xct^2);$$

$$k3 = k1 \cdot (ydo - yct); k2 = (ydo - yct)^2;$$

$$k1 = d^2 - ydo^2 - e^2 + yct^2 + xct^2.$$

Координаты xep , yep точки E_p определяются по зависимостям, аналогичным выше приведенным формулам для расчета координат xet и yet точки E_T после замены в них значений этих координат на значения координат xcp и ycp .

Синтез кинематической схемы безмуфтового пресса завершается определением координат xf и yf расположения центра шарнира F_w исполнительного управляющего звена EF_w (рис. 2), обеспечивающего приближенный выстой выходного ползуна D при полном обороте входного кривошипа. Названные координаты рассчитываются как результат пересечения окружности радиусом, равным f , с центром в точке E_p и перпендикуляром к хорде $E_T E_p$, проведенным из ее середины:

$$xf = xe0 + e0 \cdot \cos(\rho); yf = ye0 - e0 \cdot \sin(\rho),$$

$$\text{где } xe0 = 0,5 \cdot (xet + xep); ye0 = 0,5 \cdot (yet + yep);$$

$$e0 = (f^2 - 0,25 \cdot ((xep - xet)^2 + (yep - yet)^2))^{0,5};$$

$$\rho = \arctg |((xet - xep)/(yep - yet))|.$$

Кинематический анализ безмуфтового пресса в холостом режиме работы

Рассматриваемый механизм механического безмуфтового пресса представляет собой, как отмечалось [14, 15], механизм третьего класса по классификации Ассур-Артоболевского, что затрудняет его кинематический анализ в направлении от входного звена AB (рис. 2). Как правило, при рассмотрении таких механизмов используют метод понижения класса механизма за счет условной смены входного звена. При выключенном состоянии пресса в холостом режиме ползун D (рис. 2) совершает малые колебания (приближенную остановку) при полном угле поворота кривошипа AB на 360 угло-

вых градусов. Незначительные перемещения выходного ползуна D в этом режиме работы прессы затрудняют его использование как условного входного. В связи с этим в качестве условного входного звена при кинематическом анализе безмуфтового прессы в холостом режиме его работы целесообразно использовать исполнительное управляющее звено EF_w , совершающего колебательные движения на достаточно большом угле поворота.

В результате такого подхода определяются зависимости $\varphi(\psi)$ и $s(\psi)$, исключая из которых тем или иным способом аргумент ψ , получим необходимую для кинематического анализа механизма зависимость $s(\varphi)$ (здесь φ , ψ и s — углы поворота кривошипа AB и условного входного звена EF_w и перемещение выходного ползуна D соответственно).

Определим некоторые характерные положения упомянутых выше звеньев, а именно крайние предельные положения исполнительного управляющего звена EF_w и соответствующее им положение ползуна D , а также положение звена EF_w , при котором выходной ползун D займет предельное нижнее наиболее удаленное от оси A вращения кривошипа AB положение.

Начальное верхнее F_wE_p и конечное нижнее F_wE_T положения исполнительного управляющего звена EF_w , рассчитываются по формулам соответственно:

$$\psi_p = \arctg((yep - yf)/(xep - xf));$$

$$\psi_T = \arctg((yet - yf)/(xet - xf)).$$

Ординаты предельного верхнего положения D_0 ползуна D , соответствующие этим положениям звена EF_w , равны

$$ydp = yep - (yep^2 - k6)^{0.5};$$

$$ydt = yet - (yet^2 - k7)^{0.5},$$

где $k6 = xep^2 + yep^2 - d^2$; $k7 = xet^2 + yet^2 - d^2$.

Понятно, что значения ydp и ydt , рассчитанные по этим формулам, и значение ydo , рассчитанное по формуле (1), совпадают.

Ординаты предельного нижнего положения D_{00} ползуна D в холостом режиме работы прессы определяется как результат пересечения осевой линии Oy окружностью радиуса $(f - d)$ с центром в текущей точке D , что соответствует моменту совпадения звеньев DE и EF_w :

$$ydo0 = yf + (yf^2 - k8)^{0.5},$$

где $k8 = xf^2 + yf^2 - (f - d)^2$.

Положение F_wE_{VV} условного входного звена EF_w , соответствующее этому моменту, рассчитывается по формуле:

$$\psi_{VV} = \arctg((ydo0 - yf)/(xdo0 - xf)).$$

Малые колебательные перемещения s рабочего ползуна D будем отсчитывать от его предельного нижнего положения $ydo0$ до предельного верхнего ydo .

Таким образом, полное перемещение ползуна (размах) в холостом режиме работы прессы будет равно:

$$s_{\max} = |ydo0 - ydo|.$$

Определим текущие положения выходного ползуна D в функции угла поворота ψ условного ведущего звена EF_w :

$$s(\psi) = |ydo0 - yd(\psi)|, \quad (2)$$

$$\text{где } yd = ye - (ye^2 - k9)^{0.5}; \quad (3)$$

$$k9 = xe^2 + ye^2 - d^2; \quad (4)$$

$$xe = xf - f \cdot \cos(\psi_p + \psi); \quad (5)$$

$$ye = yf - f \cdot \sin(\psi_p + \psi); \quad (6)$$

где yd — ордината точки D ; xe и ye — абсцисса и ордината точки E (в предыдущих формулах (3) — (6) и в последующем, если это не требуется по контексту, указания на функциональную зависимость переменных от аргумента ψ опущены).

Для определения текущего угла поворота φ действительного входного звена AB в функции от аргумента ψ необходимо вначале определить текущие координаты $xс$ и $ус$ шарнира C как результат пересечения двух окружностей радиусов c и d , проведенных из центров соответственно D и E . После необходимых преобразований с учетом зависимостей (3–6) для принятой конфигурации механизма получим:

$$yc = n4/2 - (0,25 \cdot n4^2 - n5)^{0.5};$$

$$xc = - (c^2 - yc^2 + 2 \cdot yc \cdot yd - yd^2)^{0.5},$$

где $n4 = (2 \cdot xe^2 \cdot yd - n3)/(n2 + xe^2)$; $n5 = (n1^2 - 4 \cdot c^2 \cdot xe^2 + 4 \cdot xe^2 \cdot yd^2)/(4 \cdot (n^2 + xe^2))$; $n3 = (yd - ye) \cdot n1$; $n2 = (yd - ye)^2$; $n1 = c^2 - e^2 - yd^2 + ye^2 + xe^2$.

Два значения φ_1 и φ_2 угла поворота φ входного кривошипа AB (положения кривошипа AB и AB_1), соответствующие одному и тому же положению условного входного звена F_wE , определяются как результат пересечения окружности единичного радиуса ($a = 1$) и окружности радиуса, равного b , проведенных из центров соответственно A и C . Для их определения воспользуемся рассмотрением треугольников ABC и ACD (рис. 2):

$$\varphi_1(\psi) = \pi - \beta_1(\psi) - \beta_2(\psi); \quad (7)$$

$$\varphi_2(\psi) = \pi - \beta_1(\psi) - \beta_2(\psi); \quad (8)$$

где $\beta_1 = \arccos((1 + g^2 - b^2)/2 \cdot g)$; $\beta_2 = \arccos(|yd^2 + g^2 - c^2|/2 \cdot yd \cdot g)$; $g = (xc^2 + yc^2)^{0.5}$.

Необходимая для кинематического анализа безмуфтового прессы зависимость $s(\varphi)$ может быть получена путем исключения численными методами вспомогательного аргумента ψ из формул (2), (7) и (8).

Заметим, что в холостом режиме работы выходной ползун D совершает малые колебания выше крайнего верхнего исходного положения D_v (рис. 2) в рабочем режиме в диапазоне от $(b - 1 + c - |ydo|)$ до $(b - 1 + c - |ydo0|)$ относительных единиц. Расстояние от зоны малых колебаний ползуна D в холостом режиме работы прессы до его крайнего верхнего исходного положения в рабочем режиме существенным образом зависит от принятого значения угла асимметрии θ : оно увеличивается с увеличением угла θ . Для уменьшения этого расстояния следует уменьшать угол θ вплоть до отрица-

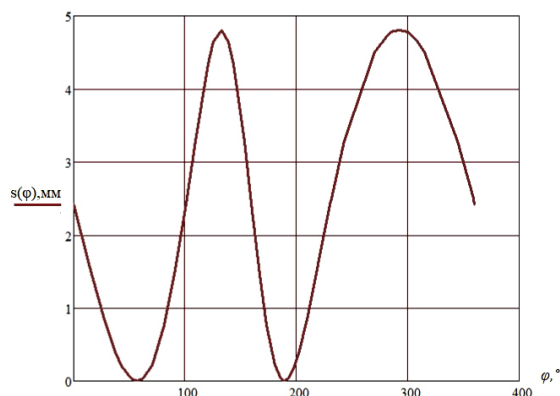


Рис. 3. Диаграмма малых перемещений выходного ползуна D

Fig. 3. Diagram of low movements of the D output slider

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

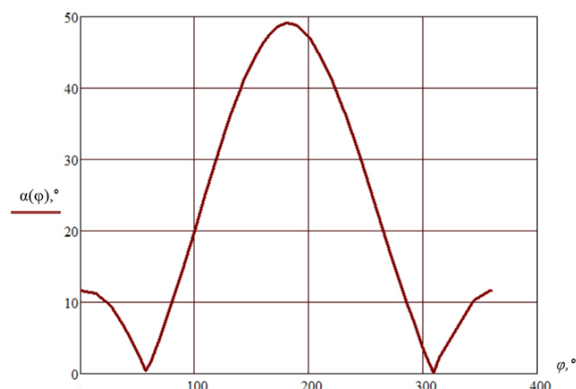


Рис. 4. Диаграмма углов давления в механизме

Fig. 4. Pressure angle diagram in the mechanism

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

тельных значений. Окончательный выбор значений угла θ должен быть подчинен получению приемлемых конструктивных параметров прессы и обеспечению благоприятных условий его работы.

Условия передачи движения в холостом режиме работы прессы

Для оценки условий передачи движений в холостом режиме работы рассматриваемого безмуфтового механического прессы будем использовать углы давления α .

Определим координаты xh и yh мгновенного центра скоростей H треугольного шатуна CE как координаты точки пересечения перпендикуляров к векторам скоростей точек E и D этого звена. То есть точка H является точкой пересечения звена EF_w с перпендикуляром к направляющей AD , проведенном из текущего положения ползуна D (на рис. 2 точка H не показана).

$$xh = xe + (yd - ye) \cdot (xf - xe) / (yf - ye);$$

$$yh = yd.$$

Углы давления α будем определять через углы передачи движения γ как функции вспомогательного аргумента ψ . Так как одному и тому же положению условного входного звена EF_w соответствуют два положения действительного входного звена AB , расположенные под углами $\varphi_1(\psi)$ и $\varphi_2(\psi)$, то можно определять также два значения угла передачи движения $\gamma_1(\psi)$ и $\gamma_2(\psi)$ для одного значения аргумента ψ в соответствии с зависимостями¹⁰:

$$\gamma_1(\psi) = \arctg[(cb1 - ch) / (1 + ch \cdot cb1)]; \quad (9)$$

$$\gamma_2(\psi) = \arctg[(cb2 - ch) / (1 + ch \cdot cb2)], \quad (10)$$

где $cb1 = (yb1 - yc) / (xb1 - xc)$; $cb2 = (yb2 - yc) / (xb2 - xc)$; $ch = (yh - yc) / (xh - xc)$; $xb1 = a \cdot \cos(0,5 \cdot \pi + \varphi_1)$; $yb1 = a \cdot \sin(0,5 \cdot \pi + \varphi_1)$; $xb2 = a \cdot \cos(0,5 \cdot \pi + \varphi_2)$; $yb2 = a \cdot \sin(0,5 \cdot \pi + \varphi_2)$.

Зависимости (9) и (10) представлены в форме, обеспечивающей получение острых углов, поскольку в данном случае не имеет значения направление вращения образующих их прямых.

Углы давления α_1 и α_2 (рис. 2) между вектором скорости V_C точки C и векторами сил P_1 и P_2 , приложенными к этой точке с учетом зависимостей (9), (10) следует рассчитывать в соответствии с известными выражениями¹¹:

$$\alpha_1(\psi) = 0,5 \cdot \pi - \gamma_1(\psi); \quad (11)$$

$$\alpha_2(\psi) = 0,5 \cdot \pi - \gamma_2(\psi). \quad (12)$$

Используя зависимости (7), (8) и (9)–(12), численно можно получить требуемую окончательную функцию $\alpha(\varphi)$ для оценки механизма с точки зрения качества передачи движения.

Пример. Рассчитаем диаграммы $s(\varphi)$ и $\alpha(\varphi)$ для механизма безмуфтового механического прессы со следующими значениями свободных параметров: $a = 1,0$; $b = 2,2$; $c = 2,4$; $d = 1,8$; $f = 2,0$. Для поиска условно неподвижной точки D_0 применим угол асимметрии циклограммы θ , равный $-0,349$ рад (-20 угловых градусов), а абсолютную длину кривошипа AB положим равной 200 мм, что обеспечит полное перемещение ползуна в рабочем режиме, равном 400 мм.

На рис. 3, 4 приведены диаграммы соответственных малых перемещений ползуна $s(\varphi)$ в миллиметрах и углов давления $\alpha(\varphi)$ в угловых градусах. Из диаграммы малых перемещений (рис. 3) видно, что полный размах таких перемещений равен $4,809$ мм при рабочем ходе в 400 мм. То есть малые перемещения ползуна в холостом режиме составляют незначительную часть от его рабочего хода. При принятых соотношениях кинематических размеров звеньев малые перемещения рабочего ползуна совершаются примерно на 200 мм выше (рис. 2) его крайнего исходного положения D_v в рабочем режиме.

Диаграмма углов давления $\alpha(\varphi)$ (рис. 4) показывает, что этот показатель в течение всего цикла

⁹ Артоболевский И. И., Левитский Н. И., Черкудинов С. А. Синтез плоских механизмов. Москва: Физматгиз, 1959. 1084 с.

¹⁰ Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. Москва: АСТ: Астрель, 2010. 703 с. ISBN 5-17-012238-1.

¹¹ Артоболевский И. И., Левитский Н. И., Черкудинов С. А. Синтез плоских механизмов.

не превышает 50° , что вполне допустимо в отсутствии в холостом режиме работы пресса полезной нагрузки.

В заключение отметим, что предложенный в статье метод синтеза рычажного механизма третьего класса для реализации холостого режима работы пресса гарантирует возможность его сборки на полном углу поворота кривошипа. Получены аналитические выражения для расчета малых перемещений выходного звена механизма и для анализа условий передачи движения в нем.

Приведенный пример подтвердил возможность получения работоспособных кинематических схем рычажных механизмов третьего класса при одних и тех же кинематических параметрах для реализации рабочего и холостого режимов работы механического безмуфтового пресса.

Список источников / References

1. Алмаматов М. З., Толошов Ч. О., Байгазиев М. История развития механизмов переменной структуры прессов // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2013. № 2. С. 130–133. EDN: TQKBXZ.

Almatov M. Z., Toloshov Ch. O., Baygazyev M. Istoriya razvitiya mekhanizmov peremennoy struktury pressov. *Vestnik Kyrgyzskogo Gosudarstvennogo Universiteta Stroitel'stva, Transporta i Arhitektury im. N. Isanova*. 2013;2:130–133. EDN: TQKBXZ. (In Russ.).

2. Аскарров Е. С., Жанкелди А. Ж., Муртазина Б. Т. Кривошипный пресс — проблемы эксплуатации и пути их решения // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2016. № 4 (99). С. 48–53.

Askarov Ye. S., Zhankeldi A. Zh., Murtazina B. T. Crank press — operating problems and their solutions. *The Bulletin of Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev*. 2016;4(99):48–53. (In Russ.).

3. Новокшченнов С. Л., Куц В. В., Смоленцев Е. В. Состояние современного уровня развития технологических процессов и оборудования кузнечно-штамповочного производства // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21, № 1. С. 134–147. <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2025.21.1.020>. EDN: UYNXLH.

Novokshchenov S. L., Kutz V. V., Smolentsev E. V. Current state of development of technological processes and equipment for forging and stamping production. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2025;21(1):134–147. <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2025.21.1.020>. EDN: UYNXLH. (In Russ.).

4. Иванов Ю. В., Коган М. С. Анализ шумообразования при работе механических прессов и опыт снижения акустической активности пневмомеханизма системы управления // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2006. № 2 (30). С. 49–52. EDN: KASMNV.

Ivanov Yu. V., Kogan M. S. Analiz shchmoobrazovaniya pri rabote mekhanicheskikh pressov i opyt snizheniya akusticheskoy aktivnosti pnevmomekhanizma sistemy upravleniya. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2006;2(30):49–52. EDN: KASMNV. (In Russ.).

5. Зыков А. С. К вопросу совершенствования конструкций исполнительных механизмов кривошипно-шатунных прессов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. № 2-3 (280). С. 40–43.

Zykov A. S. K voprosu sovershenstvovaniya konstruktсий ispolnitel'nykh mekhanizmov krivoshipno-shatunnykh pressov. *Fundamental'nyye i prikladnyye Problemy Tekhniki i Tekhnologii*. 2010;2-3(280):40–43. (In Russ.).

6. Хохлова О. А., Пономарева Е. В. Структурная классификация механизмов переменной структуры // Вестник

Астраханского государственного технического университета. 2012. № 2 (54). С. 57–62.

Khokhlova O. A., Ponomareva E. V. Strukturnaya klassifikatsiya mekhanizmov peremennoy struktury. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2012;2(54):57–62. (In Russ.).

7. Себеда Н. А. Семейства кривошипно-коромысловых механизмов: монография. Москва: Изд-во «Спутник+», 2019. 96 с. ISBN 978-5-9973-5191-5.

Sereda N. A. Semeystva krivoshipno-koromyslovykh mekhanizmov. Moscow, 2019. 96 p. ISBN 978-5-9973-5191-5. (In Russ.).

8. Chang C. H., Liao B. J., Kuo C. C. Structural design for open gap stamping press. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;134:853–870. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14146-x>.

9. Akay O. E., Catalkaya M. Synthesis of a four-bar mechanism using nonlinear regression analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2025;39:1427–1434. <https://doi.org/10.1007/s12206-025-0234-1>.

10. Gohil D., Guha A., Kulkarni M. Machine learning-based joint clearance prediction from coupler curve deviations in planar four bar mechanism. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2026;14:169. <https://doi.org/10.1007/s40435-026-02100-6>.

11. Etesami G., Felezi M. E., Nariman-Zadeh N. Optimal transmission angle and dynamic balancing of slider-crank mechanism with joint clearance using Pareto Bi-objective Genetic Algorithm. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021;43:185. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02834-8>.

12. Анцифиров А. А., Кривошеин В. А. Способы штамповки и перспективы модернизации коленных прессов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 11. С. 126–136. <https://doi.org/10.7463/1114.0733635>. EDN: TDVPBF.

Antsifirov A. A., Krivoshein V. A. Sposoby shtampovki i perspektivy modernizatsii kolennykh pressov. *Nauka i Obrazovaniye: Nauchnoye Izdaniye MG TU im. N. E. Bauman*. 2014;11:126–136. <https://doi.org/10.7463/1114.0733635>. EDN: TDVPBF. (In Russ.).

13. Olguner S., Bozdana A. T. Design, construction, and demonstration of a novel die system for deep drawing applications with utilization of ultrasonic vibrations. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024;46:124. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-04689-1>.

14. Хомченко В. Г. Кинематический синтез безмуфтового механического пресса на основе рычажного механизма третьего класса // Омский научный вестник. 2022. № 1 (181). С. 7–12. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-181-7-12>. EDN: UWZJDM.

Khomchenko V. G. Kinematic synthesis of non-clutch mechanical press based on lever mechanism of the third class. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022;1(181):7–12. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-181-7-12>. EDN: UWZJDM. (In Russ.).

15. Хомченко В. Г. Проектирование плоских рычажных механизмов цикловых машин-автоматов и манипуляторов. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1995. 152 с. ISBN 5-230-13864-5.

Khomchenko V. G. Proyektirovaniye ploskikh rychazhnykh mekhanizmov tsiklovykh mashin-avtomatov i manipulyatorov. Omsk, 1995. 152 p. ISBN 5-230-13864-5. (In Russ.).

Вклад авторов:

В. Г. Хомченко. Постановка целей и задач исследования, анализ состояния вопроса, разработка математических моделей кинематического синтеза и анализа безмуфтового кривошипного пресса, разработка алгоритмов вычислений, формулирование выводов.

Е. Г. Холкин. Проведение обзора, конкретизация и формулирование задач исследования, разработка математической модели условий передачи движения в механизме пресса, подготовка текста статьи, разработка вычислительной программы, анализ результатов расчета.

Authors' contribution:

Vasiliy G. Khomchenko. Formulation of the aim and objectives of the research, analysis of the problem, development of mathematical models for kinematic synthesis and analysis of a coupling-free crank press, development of computational algorithms, formulation of conclusions.

Evgeniy G. Kholkin. Conducting the review, specifying and formulating the research objectives, development of a mathematical model for motion transmission conditions in the press mechanism, preparation of the article text, development of a computational program, analysis of calculation results.

Информация об авторах:

ХОМЧЕНКО Василий Герасимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация и робототехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 8385-2139

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3151-7937>

AuthorID (SCOPUS): 6603880234

ResearcherID: P-8539-2015

e-mail: v_khomchenko@mail.ru

ХОЛКИН Евгений Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиноведение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7578-1104

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6681-3237>

AuthorID (SCOPUS): 56503973800

ResearcherID: Y-1112-2019

e-mail: holkin555@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт инте-

ресов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 27.02.2026; одобрена после рецензирования 20.04.2026; принята к публикации 10.06.2026.

Information about the authors:

KHOMCHENKO Vasiliy Gerasimovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Automation and Robotics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 8385-2139

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3151-7937>

AuthorID (SCOPUS): 6603880234

ResearcherID: P-8539-2015

e-mail: v_khomchenko@mail.ru

KHOLKIN Evgeniy Gennad'yevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Mechanical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7578-1104

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6681-3237>

AuthorID (SCOPUS): 56503973800

ResearcherID: Y-1112-2019

e-mail: holkin555@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 27.02.2026; approved after reviewing 20.04.2026; accepted for publication 10.06.2026.

СМЫСЛ И МЕТРИКИ «ЗНАЧЕНИЯ ТОНА» В ТЕХНОЛОГИИ И СТАНДАРТАХ ПЕЧАТИ

Ю. В. Кузнецов¹, С. П. Гнатюк², П. О. Яковлев³✉

¹ Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения,
Россия, 192102, г. Санкт-Петербург, ул. Бухарестская, 22

² Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18

³ Академия управления городской средой, градостроительства и печати,
Россия, 195273, г. Санкт-Петербург, ул. Руставели, 33А

✉ pressman1985@inbox.ru

С начала 1990-х гг. прошлого века Техническим комитетом «Технология полиграфии» было разработано и обновлено несколько десятков отраслевых стандартов. Практически каждый из них начинался со списка определений специфическим для данного документа терминам.

К настоящему времени в этой серии стандартов накопилась дюжина вариантов весьма неоднозначных толкований понятия *значение тона* — базового для автотипной печати параметра. Это создает проблему адекватной трансляции международных стандартов и обуславливает актуальность анализа сложившихся к настоящему времени разноречивых интерпретаций, а также выявления сущностных свойств данного термина. В связи с этим понятие и параметр «значение тона» рассматривается в историческом контексте совершенствования моделей иллюстрационной печати, с учетом многостадийного характера этого процесса, а также в свете решения проблем цветовой коммуникации в современной открытой и разомкнутой допечатной информационной среде.

В статье экспериментально и аналитически показана необходимость более выверенных по своей метрике интерпретаций и определений версий этого параметра по отношению к стимулу, например, яркости Y колориметрической метрики XYZ Международной комиссии по освещению, или к мере ощущения такого воздействия — светлоте L из Lab Международной комиссии по освещению. Установлен факт неуместного, присущего стимулу процентного выражения для такого перцептуального параметра, как цветное значение тона (Color Tone Value), что важно учесть в разработке версий отечественных стандартов на основе уже существующих международных регламентов.

Ключевые слова: раздражение, ощущение, метрика, светлота, яркость, растровое изображение, управление цветом, стандартизация

Для цитирования: Кузнецов Ю. В., Гнатюк С. П., Яковлев П. О. Смысл и метрики «значения тона» в технологии и стандартах печати. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 13–21. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-13-21>. EDN: NVKCJM.



© Кузнецов Ю. В., Гнатюк С. П., Яковлев П. О., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MEANING AND METRICS OF THE "TONE VALUE" IN PRINTING TECHNOLOGY AND STANDARDS

Yu. V. Kuznetsov¹, S. P. Gnatyuk², P. O. Yakovlev³✉

¹ Saint Petersburg State University of Film and Television,
Bukharetskaya St., 22, Saint Petersburg, 192102, Russia

² Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Bol'shaya Morskaya St., 18, Saint Petersburg, 191186, Russia

³ Academy of Urban Management, Planning and Printing,
Rustaveli St., 33A, Saint Petersburg, 195273, Russia

✉ pressman1985@inbox.ru

Since the early 1990s, the ISO Technical Committee for Graphic Technology has developed and updated several dozen industry standards. Almost every one of them begins with a list of definitions for terms specific to the document.

To date, the series of standards accumulate a dozen variants of very ambiguous interpretations of the concept of tone value, which is the basic parameter for autotypic printing. It creates a problem of adequate translation of international standards and determines the relevance of the analysis of the currently existing contradictory interpretations, as well as the identification of the essential features of this term. In this regard, the concept and parameter "tone value" is considered in the historical context of improving models of illustration printing, considering the multi-stage nature of this process, as well as in solving the problems of color communication in the modern open and unclosed information environment.

The article experimentally and analytically shows the need for more metric-adjusted interpretations and definitions of the parameter versions for a stimulus, for example, brightness Y of the XYZ colorimetric metric of the International Commission on Lighting, or to the extent of impact — lightness L from the Lab of the International Commission on Lighting. The authors establish the fact of an inappropriate percentage expression inherent in the incentive for such a perceptual parameter as the Color Tone Value, which is important for the development of versions of domestic standards based on existing international regulations.

Keywords: stimulus, perception, metrics, lightness, luminance, halftone, color management, standardization

For citation: Kuznetsov Yu. V., Gnatyuk S. P., Yakovlev P. O. Meaning and metrics of the "tone value" in printing technology and standards. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):13–21. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-13-21>. EDN: NVKCJM. (In Russ.).



© Kuznetsov Yu. V., Gnatyuk S. P., Yakovlev P. O., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Одобрив в 2024 г. проект новой версии стандарта офсетной печати 12647-2 (на момент подготовки статьи рассматривался документ ISO/DIS 12647-2:2023 [1]), находившийся на стадии международного обсуждения), разработанный Техническим комитетом (ТК) 130 «Технология полиграфии», представители стран — членов Международной организации по стандартизации, выдвинули к нему целый ряд замечаний общего, технического и редакционного характера [1]. По этой причине, а также в связи с необходимостью уточнения целевых значений нового метода калибровки «по цвету, близкому к ахроматическому» [2], ТК 130 временно приостановил продвижение проекта нового стандарта.

Подлежащие доработке вопросы, к сожалению, не затронули толкований в этом документе целого кластера версий термина *значение тона (tone value)*, касающегося важнейшего свойства автотипного изображения в настройке и калибровке печати. По мере появления новых и обновления уже имевшихся по этой части стандартов возникла потребность в более точных, а иногда и разных по своей

сути и метрике, трактовках этого термина. На данный момент в документах ТК 130 накопилась дюжина дополнительных введенных или изменявшихся от редакции к редакции вариантов:

- значение тона (данные), цифровое значение тона;
- значение тона (печать), значение печатного тона;
- значение тона (денситометрическое);
- прирост значения тона (Tone Value Increase TVI);
- значение тона (печатная форма), значение тона на пластине;
- значение тона (колориметрическое);
- цветное значение тона (Color Tone Value CTV);
- значение тона по цветовому различию;
- трехкрасочное (СМУ) почти нейтральное значение тона;
- близкое к нейтральному черному значение тона.

В проекте обновляемой ныне редакции была сделана попытка установить в этом кластере не-

кий порядок, подчинив частные термины основным с помощью индексации подпунктов в третьем разделе документа «Термины и определения». Тем не менее их смысл остался по ряду аспектов неопределенным, а толкование не всегда логичным, нуждающимся в некотором анализе, разъяснении, уточнении. Более того, возникают и некоторые проблемы адекватного перевода терминов при подготовке отечественных версий данной серии стандартов.

Решение перечисленных задач непосредственно связано с совершенствованием стандартизации параметров печатного процесса и разработкой корректных методов оценки качества печатной продукции. В соответствии с этим данная статья выполнена в рамках научной специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» и отвечает требованиям её паспорта по п. 2 (научно-практические основы стандартизации и управления качеством) — через анализ терминологии и метрик проекта международного стандарта ISO 12647-2, а также по п. 5 (методы оценки качества объектов и процессов управления качеством) — через сопоставление денситометрических и колориметрических методов оценки значения тона, прироста тона (TVI) и цветового значения тона (CTV).

Денситометрическая и колориметрическая калибровка

Согласно бинарному по своей сути принципу автотипного способа (есть краска/нет краски), меру тона на оттиске исторически принято оценивать относительно и выраженной в процентах площадью покрытия краской. Промежуточные серые градации, например, в черно-белой печати симулируются здесь аддитивным пространственным смещением частей черного растровых точек и белого незапечатанной бумаги — пробелов. В многокрасочной печати n красками, цветовые градации оценивают взвешенной суммой площадей 2^n участков, входящих на пробелы, единичные красочные слои и комбинации их наложений. По этой логике еще в 1932 г. Н. Д. Нюберг для имитации результирующего цвета в так называвшейся тогда «трехцветке» предложил временной аддитивный способ ее визуального моделирования на вращающемся диске Максвелла, разделенном в заданном для оттиска соотношении количества красок на восемь (2^3) разноцветных секторов [3].

Для монохромной печати ($n = 1$) Шеберстов и Мюррей независимо друг от друга предложили в 1936 году расчет оптической плотности растрового поля из занимаемой краской относительной площади. Их формула и поныне широко используется в денситометрическом варианте контроля и калибровки печати [4, 5].

По той же аналогии, т. е. с учетом сегментации микроструктуры оттиска на разноокрашенные участки, Нейгебауэр опубликовал в 1937 г. обобщенную модель, применимую к произвольному числу n красок и расчету цвета печати в различных метриках [6, 7].

Все эти поначалу чисто геометрические интерпретации со временем дополнялись и развивались с учетом влияния ряда побочных свойств и особен-

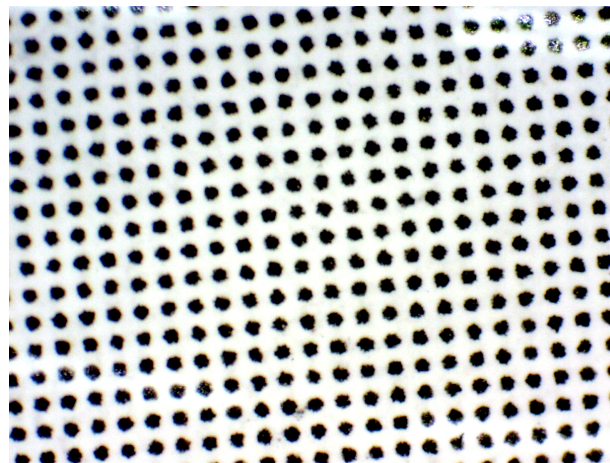


Рис. 1. Микрофотография растрового поля, визуально покрытого краской более чем на 12 %, но со значением 6,5 % по денситометрической оценке
Fig. 1. Microphotograph of the halftone tint with visual ink coverage over 12 % contrary to 6.5 % due to densitometric estimation

ностей взаимодействия красок, печатных подложек и освещения. Было предложено учитывать, в частности:

- захват рассеянного в пробеле света краем печатного элемента [8, 9];
- зависимость толщины красочного слоя от размера точек [10];
- сопутствующее этому изменение спектра отражения¹;
- многократное отражение света в запечатываемом материале [11];
- переменное по тоновому диапазону влияние цветности последнего на цвет растрового поля [12] и других факторов.

Исследования показали, что толщина красочной пленки на растровых точках резко уменьшается со снижением их площади от 70 %, что делает денситометрическую оценку их размера менее достоверной с переходом к более светлым градациям. Например, даже без учета так называемого оптического растискивания расчет покрытия по Шеберстову — Мюррею при плотностях подложки 0,1 и сплошного слоя 1,55 дает значение 6,5 %, т. е. вдвое меньшее фактически наблюдаемого (рис. 1)¹. Дополнительные погрешности вносят и шумы процесса, ведущие к нестабильной пропечатке самых мелких точек и пробелов.

Традиционная денситометрическая калибровка была со временем дополнена колориметрическим вариантом. Обе продолжают оперировать парами понятий и параметров, которые в силу известных физиологических законов весьма нелинейно связаны друг с другом. Первые в этих парах относятся к стимулу или раздражению, воздействующему на зрение, а вторые — к реакции, ощущению этого воздействия. В денситометрии такую пару составляет коэффициент отражения и его отрицательный логарифм — оптическая плотность, тогда как в колориметрии аналогичные роли выполняют яркость, например, Y из XYZ и мера ее ощущения — светлота L из Lab. Но следует обратить вни-

¹ Emmel P. Physical models for color prediction. Chapter 3 in Digital Color Imaging. Handbook. Ed. by G. Sharma. CRC PRESS, 2003. 764 p.

Расчёт покрытия

денситометрический колориметрический
восприятие → стимул стимул → восприятие
(опт. плотность) (отражение) (яркость) (светлота)

Рис. 2. Противоположная смена метрик
в способах оценки по калибровочным шкалам
Fig. 2. Contrary metrics replacement
in the assessment methods on calibration scales

мание на то, что порядок использования этих параметров в данных методах как бы противоположен (рис. 2).

В первом способе на основе оптической плотности (восприятие) рассчитывают покрытие/поглощение (возбуждение), а в другом, напротив, на основе яркости Y (стимула) определяют нечто, называемое ныне *цветовым значением тона* — CTV и измеряемым в процентах, но в равноконтрастной, увязанной с восприятием метрике Lab Международной комиссии по освещению (МКО). В указанной дефиниции, склоняющейся к привычной *степени покрытия*, и скрывается принципиальное различие метрик в надежде на надежащий его учет программами обработки калибровочных кривых.

Тем не менее понятие *значение тона*, изначально относившееся к запечатываемой площади, так и остается обобщающим базовым параметром печатного изображения в серии стандартов ISO «Полиграфические технологии» с 1996 г. [13, 14].

Характеристики стадий и процесса

Воспроизведению градаций в автотипии присущее множество физико-механических и информационных преобразований, начиная от перехода свет — электрический сигнал при считывании/съемке оригинала/объекта и заканчивая возвратом от некоторого, не раз с той или иной целью измененного сигнала к количеству краски на оттиске. Каждой из таких стадий, как и всему процессу в целом, присуща нелинейная связь входных и выходных значений.

Характеристику передачи (вход/выход) каждого этапа оптимизируют по его собственному критерию. Например, при вводе изображения им может быть динамический диапазон сигнала. Для изготовления формы таким критерием, по большей части, служит однозначность переноса краски ее печатающими элементами на оттиск и тиражестойкость, а на конечной печатной стадии — интервал воспроизводимых плотностей и цветовой охват.

Однако в стандарте подобные критерии или удовлетворяющие им настройки процесса не оговариваются. Согласно своему названию, он «учит» лишь калибровке как приведению результата печати в соответствие некому цветовому профилю или к условиям, позволяющим создать и зарегистрировать новый выходной профиль. О некоторых настройках можно лишь косвенно судить по выбранному из множества комплектов *условий печати* (Printing Conditions — PC). Только подача краски однозначно задана по прописанным в таком условии цветовым значениям сплошных красочных слоев. Однако остальные важные параметры процесса стандарт не оговаривает, полагаясь на квалификацию и опыт печатника.

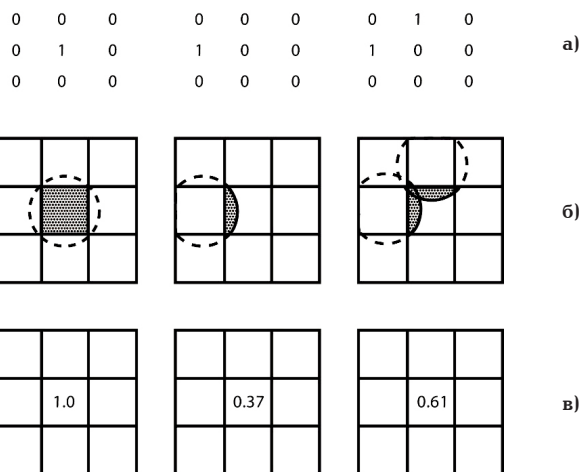


Рис. 3. Элемент копии частично окрашен, даже если это не предусмотрено в распечатываемом файле:
а) битовая карта; б) положение луча при записи;
в) значение тона на копии

Fig. 3. The copy element is partially colored, even if this is not provided for in the printed file: а) bit map; б) recording beam position; в) tone value on a copy

К указанным настройкам можно отнести давление в зоне контакта, объем и диапазон использования четвертой черной краски, установку уровней белого и черного [13]². Последние определяют важнейший из показателей качества изображения — его контраст, согласно которому только и может быть обоснован выбор линиатуры раstra для того или иного способа печати [15, 16].

От всех этих параметров процесса существенно зависит реально достижимый уровень показателей качества иллюстрационной печати. В отсутствие оптимизации по указанным критериям нельзя быть уверенным, что репродукционные возможности процесса, подлежащего калибровке на соответствие профилю, реализованы в полной мере. В этом смысле не помогает и ISO/TS 10128 IDT, в котором разъясняются лишь методы обеспечения соответствия цветовому профилю. Таким образом, появляется необходимость в еще одном стандарте, например, с названием «Оптимальная организация печатного процесса для его последующего профилирования или калибровки».

Задачу и результат печати выражает общая градационная кривая всего процесса (Tone Reproduction Curve — TRC), которая связывает значения тона в файле и на оттиске. Она вытекает из совокупности характеристик всех промежуточных стадий, что принято наглядно иллюстрировать диаграммами взаимосвязанных графиков, каждый из которых отображает передачу отдельного этапа [15]. Вопросы калибровки под такую кривую весьма актуальны в печатной практике и разработке стандартов для временной открытой и зачастую разомкнутой по отдельным стадиям репродукционной технологии [17].

Одним из главных параметров здесь служит *прирост значения тона*³ (Tone Value Increase — TVI), который можно представить суммой поэтапных разностей:

- значения тона (данные) и значения тона (печатная форма);
- значения тона печатной формы и доли ее покрытия краской;
- этой доли на форме и на оттиске.

Как показано на рис. 3, одну из причин нелинейности на первом из этапов можно объяснить несо-

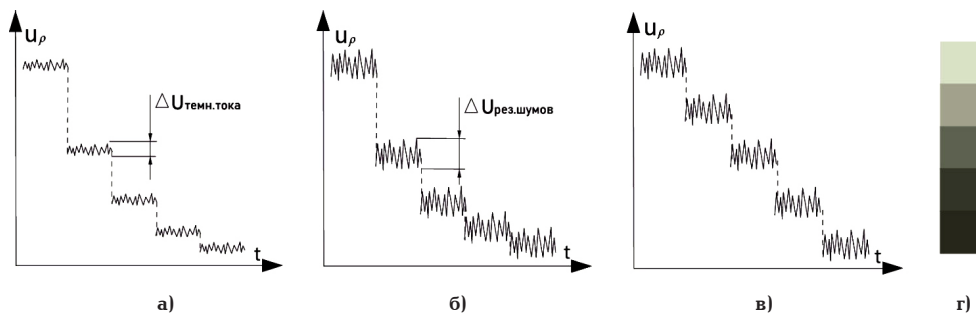


Рис. 4. Форма сигналов на выходе считывателя (а) для визуально равномерной ступенчатой шкалы (г) и к концу процесса: без (б) и с использованием (в) нелинейного преобразования исходного сигнала

Fig. 4. Signal waveform at the capturing device output (a) for the visually uniform step scale (г) and towards the end of the process: without (б) and with (в) nonlinear transformation of the original signal

ответствием формы квадратной ячейки исходной, ортогональной битовой карты и круглой или овальной апертуры луча, экспонирующего формную пластину [18].

Это несоответствие компенсируют так называемые линейаризации формы путем внесения соответствующих коррекций в управляющий сигнал [19]. Тем не менее в последующем переносе из раскатной системы на форму результирующее покрытие краской существенно превысит площадь ее печатающих элементов, как только соседние капли коснутся друг друга где-то в средних тонах. Силы поверхностного натяжения, до того сдерживавшие краску в менисках, меняют здесь свое действие на противоположное, способствуя ее затеканию в пробелы.

На последнем из этих трех этапов причины несоответствия исходного (на форме) и результирующего (на оттиске) значения в наибольшей степени обусловлены растискиванием и впитыванием краски в запечатываемый материал. Прирост тона усиливается еще и тем, что при постоянстве угла смачивания объем краски в менисках на форме растет быстрее их площади. Считается, например, что толщина слоя краски соответствует десятой части диаметра точки. Сдерживать этот рост сегодня пытаются, перфорируя растровые элементы точно или кольцами [20].

По особенностям указанных взаимодействий можно также судить и о том, что реальная кривая прироста тона, в отличие от некоей теоретической, исходит не из начала координат, а от значения минимальной, еще не «растиснутой» и едва перешедшей на подложку растровой точки — уровня белого. Заканчивается она там, где возникает сплошной слой, т. е. при исходном значении несколько меньшем, чем 100 %.

Положение экстремума и сама форма этой кривой зависят от конфигурации печатающего элемента (квадратный, круглый, эллиптический) и от геометрии раstra (нерегулярный, ортогональный, гексагональный, линейный). В последнем случае затеканию вообще нет места, поскольку при касании сразу образуется сплошной слой и правомерно предположить, что характеристика прироста тона здесь существенно отличается от тех, полиномы аппроксимации которым прописывают нынешние ISO стандарты без какого-либо указания на геометрию раstra и печатающего элемента [13, 14].

По этим же причинам установка натиска по такому денситометрическому параметру, как *контраст печати*, оцениваемому по формуле

$$K = 100 (D_s - D_{80}) / D_s, \quad (1)$$

где D_s и D_{80} — плотности сплошного красочного слоя и растрового поля только что коснувшихся друг друга точек, представляется пригодной лишь для точечных растровых структур оговоренной геометрии.

Преобразования сигнала изображения

Упомянутым выше преобразованиям зачастую сопутствует смена метрики данных. Например, еще в аналоговых сканерах сигнал сенсора, близкий по смыслу яркости или отражению/поглощению оригинала, сразу же логарифмировали с переходом к более информативным, увязанным с восприятием денситометрическим равноконтрастным значениям. Поскольку на выходе снова оперируют сигналом покрытия краской, который пропорционален поглощению, необходимость такого преобразования может показаться не очевидной.

В книге [15] на примере репродуцирования визуально равномерной ступенчатой шкалы (рис. 4г) это объясняется тем, что сигнал в размерностях, увязанных со зрительным восприятием, например, светлоты L в метрике Lab МКО или оптической плотности более устойчив к помехам.

Мощность последних возрастает к концу процесса, складываясь из шумов отдельных этапов. На выходе сенсора (рис. 4а) это лишь его «темновой» фототок, но к нему далее добавляются флуктуации $r-n$ переходов электроники, шумы квантования аналого-цифрового преобразования и формирования печатающих элементов из микроточек (рис. 4б, в). Если сигнал не логарифмирован, то, как видно из рис. 4б, воздействие результирующих помех наиболее разрушительно, поскольку ступени как бы «тонут» в шумах лишь в одной части тонового диапазона. И, напротив, если сигнал приведен к равноконтрастным значениям еще в самом начале, когда шум еще мал, суммарные помехи равномерно распределяются по диапазону и их действие оказывается менее поражающим (рис. 4в).

Во избежание потерь информации при подобном нелинейном преобразовании полученный за красным, зеленым и синим фильтрами исходный сигнал кодируют десятью и более разрядами двоичного кода, т. е. со значительным запасом по числу уровней квантования по отношению к стандартному восьмиразрядному его представлению, например, в PDF/X файле. В сканере, оснащенном 30-битным аналого-цифровым преобразователем, каждый из поступающих аналоговых RGB-сигналов квантуется

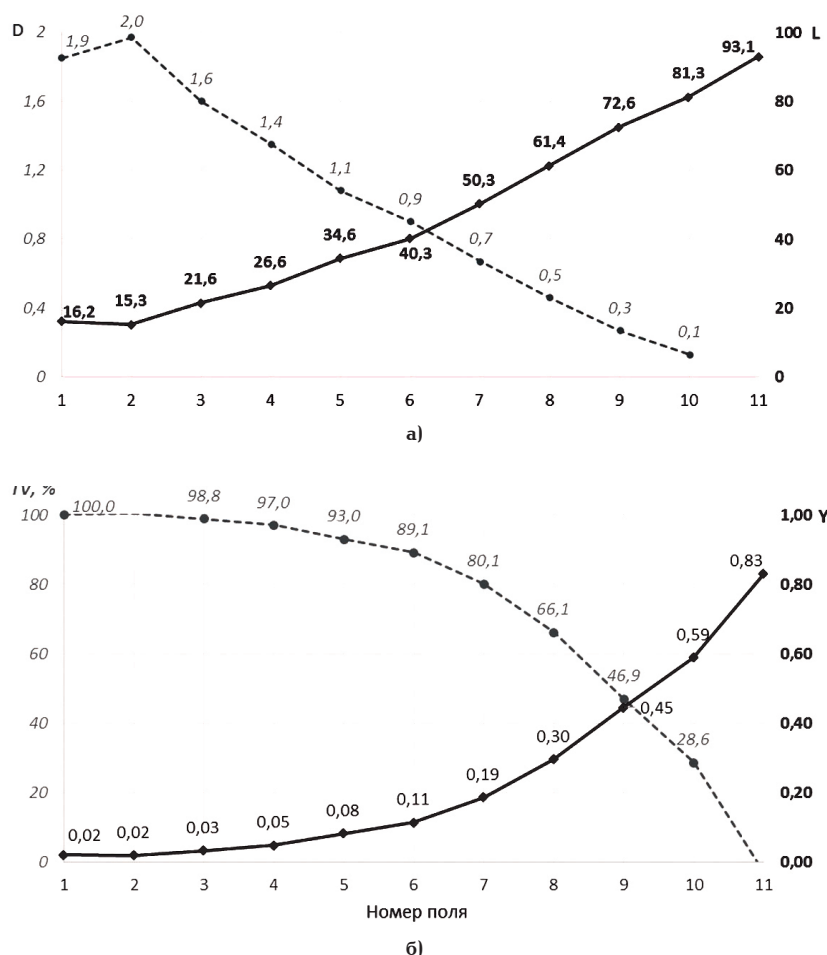


Рис. 5. Значения светлоты L по Lab МКО и оптической плотности распределены линейно по ступеням шкалы, отпечатанной через равные интервалы из файла PDF/X (а), но не площади точек TV или яркости Y (б)
Fig. 5. Lightness values L at the Lab of the International Commission on Lighting and an optical density are distributed linearly across the steps of a scale printed at equal intervals from a PDF/X file (a), but not the Tone Value or Y luminance (б)

по шкале $2^{10} = 1024$ уровней. Благодаря этому резерву на участке преобразования с градиентом 4/1 каждому из выходных восьмибитных значений соответствует хотя бы один уровень входного сигнала.

Актуальность перехода в равноконтрастную метрику возрастает с увеличением интервала яркостей объекта, поэтому считыватели могут оснащаться и 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем по каждому цветовому каналу. Использование такого сигнала в допечатной программе позволяет без потерь производить необходимые нелинейные цветовые преобразования или устранять избыточность информации в векторном пространстве XYZ МКО до перехода в скалярную Lab метрику.

Обратное преобразование в сигнал количества краски обеспечивается в битовой карте драйвером принтера или в растровом процессоре за счет нелинейной связи между площадью печатного элемента и числом образующих ее микроточек.

«Значение тона» — мера зрительного стимула и его восприятия?

Термин значение тона обобщенно задан в пп. 3.3 проекта стандарта как *площадь покрытия* (area coverage) — отношение площади, покрытой

краской, к общей площади измеряемого участка. Напрямую это связано с коэффициентом поглощения или яркостью, воздействующей на зрение. Но, как уже упоминалось, ощущение связано с тем или иным типом раздражения весьма нелинейно.

Чтобы разрешить конфликт метрик в оценке поля контрольной шкалы, пп. 3.3.1 вводит понятие *apparent intensity*. Оно далее не встречается по тексту, а используется здесь же лишь как некий атрибут в последующих вариантах определения к обсуждаемому термину. Из-за отсутствия такого понятия в многоязычном словаре МКО² о его сути можно лишь косвенно судить по пояснениям и размерностям в этом же и следующих подпунктах проекта. Изначально в пп. 3.3.1 он поясняется такими принятыми в лексике МКО терминами, как *светлота* (*brightness, lightness*), характеризующими восприятие/ощущение *яркости* (*luminance*), из чего можно заключить, что речь идет именно о воспринимаемой яркости, а не о некой «явленной» наблюдателю силе, *интенсивности*.

И только в следующем, равновесном пп. 3.3.2, формулируется само значение тона как *воспринимаемая яркость*, но в числах от 0 до 1 или от 0 до 100 %. Такие единицы присущи самой яркости,

оцениваемой координатой Y в XYZ МКО или линейно связанной с ней *площадью покрытия* по пп. 3.3, но никак не их восприятию [22]. Мерой последнего и служит светлота L равноконтрастного цветового пространства Lab МКО, вычисляемая в размерности 1–100 ед. из яркости Y по известной весьма нелинейной зависимости:

$$L = 116 (Y/Y_{ref})^{1/3} - 16. \quad (2)$$

Координаты цветности a и b оценивают в единицах от -100 до $+100$ каждая.

С переходом от возбуждения к ощущению меняется размерность [23]. Однако указание ее единиц в яркостях или относительных площадях (0–1 или 0–100 %) не согласуется с указываемой здесь же возможностью любого толкования данного термина. Это спорно, например, в отношении цифрового значения тона T — *цифровые значения для СМЮК в документе PDF/X, который будет напечатан* (пп. 3.3.4).

При переходе к светлотам L в PDF/X файле единицы 0–1 яркости или 0–100 % покрытия (СМЮК) квантуют по шкале 0–255 восьмиразрядного кода весьма нелинейно, например, по указанной выше формуле. Поэтому метрики яркости или покрытия в значении тона, подлежащем кодированию, и того, что представлен в файле, оказываются различными [23]. Чтобы показать это, на офсетной машине черной краской с линиатурой автотипного раstra 60 лин/см (150 lpi) была напечатана контрольная тоновая шкала, каждая из десяти ступеней которой отличалась от соседних на равные интервалы исходного PDF/X кода. Методика этого эксперимента соответствовала построению контрольных шкал по стандарту ISO 12647-2, предписывающему отличия соседних полей в 10 %. И денситометрические, и колориметрические измерения осуществлялись спектрофотометром eXact Advanced. Первые из них проводились через поляризационный фильтр, относительно бумаги, с геометрией $45^\circ/0^\circ$ и по Статусу Е МКО. Цветовые параметры оценивались относительно белого эталона с геометрией измерения $45^\circ/0^\circ$ на черной основе и с расчетами под стандартного наблюдателя МКО 2° и с освещением источником D50.

Равноконтрастность шкал и, соответственно, исходного сигнала подтвердилась близким к линейному распределению светлоты L и плотности D (рис. 5а), а не площадей растровых точек (%) или яркостей Y (рис. 5б).

Для случая черно-белой шкалы кривая цветового значения тона (CTV) совпадает с кривой для L , поскольку с использованием лишь координаты Y формула

$$SCTV = 100 \cdot \frac{\sqrt{(V_{x,l} - V_{x,p})^2 + (V_{y,l} - V_{y,p})^2 + (V_{z,l} - V_{z,p})^2}}{\sqrt{(V_{x,s} - V_{x,p})^2 + (V_{y,s} - V_{y,p})^2 + (V_{z,s} - V_{z,p})^2}}, \quad (3)$$

где все V рассчитываются подобно светлоте L в Lab МКО из координаты яркости Y в XYZ, МКО по выражению (2) преобразуется в частное разностей по светлоте (дельта L):

$$SCTV (ч / б) = 100 \cdot \frac{(V_{y,l} - V_{y,p})}{(V_{y,s} - V_{y,p})} = 100 \cdot \frac{L_l - L_p}{L_s - L_p}, \quad (4)$$

а при значениях светлоты бумаги $L_p \approx 100$ и сплошного красочного слоя $L_s \approx 0$ дает

$$SCTV (ч/б) = 100 - L_p. \quad (5)$$

По аналогии со светлотой, измеряемой в единицах от 0 до 100, можно бы назвать такой параметр «темнотой» или «темнотью».

Этими и приведенными выше кривыми подтверждается, что нумерация полей шкал линейна в отношении именно такого специфического атрибута цвета. Но его, к сожалению, оценивают для $SCTV$ (3) в процентах, как бы предлагая практикам привычное *покрытие*, несмотря на то, что шкалы, равного в таких процентах шага, весьма неравномерны.

Прирост значения тона

Печатное значение тона в подчиняющем в документе последующие (от пп. 3.3.7.1 до 3.3.7.6) также определено как *воспринимаемая яркость*, т. е. с акцентом на перцептивный, равноконтрастный характер параметра, и исключая метрики в количествах краски или яркостях. Но такое свойство не присуще, например, следующему в пп. 3.3.7.1 денситометрическому значению тона. Вычисляемое в относительных площадях растровых точек по формуле Шеберстова — Мюррея значение характеризует стимул — яркость, а не меру ее восприятия.

Указанный конфликт метрик и проявляется далее (пп. 3.3.7.2) в определении *прироста значения тона (TVI)* как *разности денситометрического значения тона* (пп. 3.3.7.1) и *цифрового значения тона* (пп. 3.3.4). Тем самым позволяет вычитать из некоторых данных их же нелинейно связанную долю.

Напротив, атрибут воспринимаемая яркость звучит вполне правомерно в пп. 3.3.7.3 применительно к цветовому значению тона (CTV), оцениваемому в равноконтрастной метрике Lab. Здесь же и рекомендуется отличать цветное значение тона от колориметрического значения тона (по ISO 12647-1), поскольку последнее вычисляется напрямую из координат XYZ. В отличие от расчета TVI по пп. 3.3.7.2, метрики уменьшаемого и вычитаемого в пп. 3.3.7.4 для разности цветового значения тона: $дельтаCTV = CTV - T$, где T — цифровое значение тона по пп. 3.3.4, совпадают.

Тем не менее вряд ли уместно (примечания к пп. 3.3.7.3) оценивать CTV аналогично покрытию в процентах, присваивая 0 % подложке, а 100 % — сплошному красочному слою. Там же и оговаривается, что калибровочные шкалы равноконтрастны. Кроме того, в таблицах 2–5 целевые значения уровня дельта CTV , в отличие от TVI , заданы документом именно в Lab метрике как положительными, так и отрицательными отклонениями от цифрового значения тона T . Таким образом, не уместно, как предлагает проект стандарта, характеризовать их некой линейной CTV кривой по аналогии с денситометрической TVI , тогда как речь идет о положительном или отрицательном смещении от целевого цветового значения тона.

Выводы

Значение тона исторически оценивают относительной площадью, запечатываемой краской на единичном участке автотипного оттиска. Модели иллюстрационной печати, изначально основанные на чисто геометрической посылке, со временем дополнялись учетом множества побочных физических и физиологических факторов взаимодействий в системах «форма — краска — бумага» и «освещение — оттиск — зрение». Сегодня варианты указанного

параметра используют в представлении характеристик передачи различных физических этапов печатного процесса и в колориметрических преобразованиях, которым зачастую сопутствует смена способа кодирования, метрики и нормирования сигнала изображения.

Числа от 0 до 100, проставляемые от самого светлого до темного возле полей шкал контроля, соответствуют метрике такого увязанного с восприятием атрибута цвета, как «темнота» (100 — светлота L), что и обеспечивает визуально равный контраст ступеней этих шкал. Поэтому нормирование измеряемых значений тона смесовых (SCTV) и цветового значения тона триадных (CTV) красок более правомерно в равноконтрастной мере ощущений, а не в привычных для практики процентах площади покрытия, напрямую увязанных с возбуждением.

Определения данного параметра целесообразно формулировать в отечественных версиях этой серии стандартов с учетом соответствия нормировки их значений как типу и характеру метрики, так и способу кодирования. Это обеспечит более однозначную трактовку смысла чисел возле полей шкал контроля как аргумента измеряемых калибровочных функций.

Помимо общих условий (Printing Conditions) по части используемых красок, подложек и способа печати, для гарантии полной реализации репродукционных возможностей процесса необходимо оговаривать в стандарте рабочий эффективный интервал значений тона, а также линиатуру, геометрию раstra и его печатающего элемента.

Благодарности / Acknowledgments

Авторы выражают искреннюю благодарность А. А. Шабельской за помощь в проведении и обработке результатов измерений.

The authors express their sincere gratitude to A. A. Shabelskaya for her assistance in conducting and processing the measurement results.

Примечания

¹ За исключением подложки (0 %) и сплошного красочного слоя (100 %), какие-либо расчеты в областях ниже 10 % и выше 90 % последние стандарты серии 12647 не рекомендуют.

² Уровни белого и черного, отделяющие рабочий интервал иллюстрационной печати от шумов, ранее оговаривались как 3–5 % и 95–97 %, но теперь даже не упоминаются в документах ТК 130 Международной организации по стандартизации.

³ Ранее использовался термин “dot gain” (растискивание).

Список источников / References

1. ISO/DIS 12647-2. Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 2: Offset lithographic processes. ISO/TC 130 Draft N 5077, 2023. (Проект стандарта).

2. Тарасов Д. А., Мильдер О. Б. Математика и практика инвариантов цветовых пространств на примере определения баланса по серому для цифровой печатной системы // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 1. С. 117–126. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-580>. EDN: AQWYFC.

Tarasov D. A., Milder O. B. Mathematics and practice of color space invariants by the example of determining the grey balance for a digital printing system. Computer Optics. 2020;44(1):117–126. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-580>. EDN: AQWYFC. (In Russ.).

3. Нюберг Н. Д. Курс цветоведения. Москва — Ленинград: Гос. изд-во легкой промышленности, 1932. С. 86–87.

Nyuberg N. D. Kurs tsvetovedeniya. Moscow—Leningrad, 1932. P. 86–87. (In Russ.).

4. Шеберстов В. И. Количественные соотношения позитива и негатива для нормального воспроизведения оригинала в автотипном процессе // Труды НИИ ОГИЗа. 1936. Вып. 3. С. 46.

Sheberstov V. I. Kolichestvennyye sootnosheniya pozitiv i negativa dlya normal'nogo vosproizvedeniya originala v avtotipnom protsesse. Trudy NII OGIZa. 1936;3:46. (In Russ.).

5. Murray A., Davies E. Monochrome reproduction in photoengraving. *Journal of the Franklin Institute*. 1936;221:721–744.

6. Neugebauer H. E. J. Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbenbuchsdrucks. *Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie*. 1937;36:73–89. (In Germ.).

7. Amidror I., Hersh R. D. Neugebauer and Demichel: Dependence and Independence in n-Screen Superpositions for Colour Printing. *Color Research and Application*. 2000;25(4):267–277.

8. Jule I. A., Nielsen W. I. The penetration of light into paper and its effect on halftone reproduction. *TAGA Proceedings*. 1951:65–76.

9. Ide O. Colorimetric dot gain analysis using Yule-Nielsen n. *Journal of Imaging Science and Technology*. 2002;46(2):136–141.

10. Byer R. J. Ink film thickness and its relation to dot size in photo offset lithography. *Thesis. Rochester Institute of Technology*, 1969. P. 20.

11. Yang L., Kruse B. Scattering and absorption of light in turbid media. In: *Advances in printing science and technology. Proceedings of the 26th International Research Conference of IARIGAI*. Munich, 1999.

12. Голунов А. В., Голунова А. С., Щеглов С. А. [и др.]. Влияние неоднородности структуры изображения на регистрируемые значения координат цвета // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 2. сс. 426–431. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-2-426-431>. EDN: ZPXWRL.

Golunov A. V., Golunova A. S., Shcheglov A. S. [et al.]. Investigation of the influence of image structure inhomogeneity on recorded values color coordinate. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskiye Nauki*. 2023;2:426–431. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-2-426-431>. EDN: ZPXWRL. (In Russ.).

13. ISO 12647-2:2013. Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints. Part 2: Offset lithographic processes. Released 2013-12. ISO/TC 130, 2013. 25 p.

14. ISO 12647-1:1996. Graphic technology — Process control for the manufacture of half-tone colour separations, proof and production prints. Part 1: Parameters and measurement methods. Released 1996-10. ISO/TC 130, 1996. 12 p.

15. Кузнецов Ю. В. Основы технологии иллюстрационной печати: монография. Санкт-Петербург: «Российская культура», 2016. 440 с. ISBN 978-5-905618-04-8. EDN: YVDZJB.

Kuznetsov Yu. V. Osnovy tekhnologii illyustratsionnoy pechati. Saint Petersburg, 2016. 440 p. ISBN 978-5-905618-04-8. EDN: YVDZJB. (In Russ.).

16. Kuznetsov Y. V. Does Still Some Philosophy Exist for the Halftone Frequency Selection? *Proceedings of the IS&Ts NIP 15: 1999 International Conference on Digital Printing Technologies*. Orlando, 1999. P. 362–365.

17. Birkett W. B., Spontelli Ch. Optimal Tone Reproduction Curves for Color Printing. *TAGA Proceedings*. 2018. P. 203–226.

18. Carrara D. A. [et al.]. Recent progress in digital halftoning. *Proceedings of IS&Ts 8th International Conference on Non-Impact Printing Technologies (NIP 8)*. 1992. P. 25–39.

19. Sanger K. M. Method for adjusting dot-gain for a halftone binary bitmap. US patent 0030329 A1; filed August 6th, 2003; published Feb. 10th, 2005.

20. Samworth M., Cadogan P. Method of controlling the ink film thickness on a printing plate. US patent 0002384 A1; filed April 13th, 2006; published Jan. 4th, 2007.

21. Giorgianni T. J., Madden Th. E. Digital color management. Encoding solutions. Addison-Wesley, 1998. 576 p.

22. Birkett W. B., Spontelli C. Colorimetric Tone Value (CTV) A Proposed Single-Value Measure for Presswork. URL: http://optimalmethod.org/resources/Colorimetric_Tone_Value_v6.pdf (accessed: 01.12.2026).

23. Kitakubo Sh., Hoshino Y. Relation between some characteristics of errors caused by binarizations and print quality. IS&T NIP13 Proceedings, 1997. P. 550–553.

Вклад авторов:

Ю. В. Кузнецов. Анализ состояния вопроса, формулирование цели и задач исследования.

С. П. Гнатюк. Постановка эксперимента, анализ и обработка его результатов.

П. О. Яковлев. Проведение эксперимента, формулирование результатов и подготовка текста работы.

Authors' contribution:

Yuri V. Kuznetsov. Analysing the issue status, formulation of the research aim and objectives.

Sergey P. Gnatyuk. Setting up the experiment, analysing and processing its results.

Pavel O. Yakovlev. Conducting the experiment, formulating the results and preparing the text of the article.

Информация об авторах:

КУЗНЕЦОВ Юрий Вениаминович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Фотография и народная художественная культура» Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7583-3280

AuthorID (РИНЦ): 359125

e-mail: yurivk@mail.ru

ГНАТЮК Сергей Павлович, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Технология полиграфического производства» Высшей школы печати и медиатехнологий Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3170-7280

AuthorID (РИНЦ): 618210

e-mail: ganatetsky@yandex.ru

ЯКОВЛЕВ Павел Олегович, инженер типографии Академии управления городской средой, градостроительства и печати, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 5475-0394

AuthorID (РИНЦ): 1125752

e-mail: pressman1985@inbox.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 02.12.2025; одобрена после рецензирования 07.05.2026; принята к публикации 01.06.2026.

Information about the authors:

KUZNETSOV Yuriy Veniaminovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Photography and Art Culture Department, Saint-Petersburg State University of Film and Television, Saint Petersburg.

SPIN-code: 7583-3280

AuthorID (RSCI): 359125

e-mail: yurivk@mail.ru

GNATYUK Sergey Pavlovich, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Graphic Technology Department, High School of Print and Media Technologies, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg.

SPIN-code: 3170-7280

AuthorID (RSCI): 618210

e-mail: ganatetsky@yandex.ru

YAKOVLEV Pavel Olegovich, Engineer of the Printing Department, Academy of Urban Management, Planning and Printing, Saint Petersburg.

SPIN-code: 5475-0394

AuthorID (RSCI): 1125752

e-mail: pressman1985@inbox.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 02.12.2025; approved after reviewing 07.05.2026; accepted for publication 01.06.2026.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ СООТВЕТСТВИЯ НАЗНАЧЕННЫХ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ СОДЕРЖАНИЮ СТАНДАРТА

Т. В. Казанцева¹, Н. К. Казанцева¹, М. А. Полякова²✉,
В. А. Александров³, Е. О. Параскивая¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

³Уральский государственный аграрный университет,
Россия, 620000, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42

✉ m.polyakova-64@mail.ru

В настоящее время в научной литературе ключевые слова используются как один из идентификационных признаков, позволяющих определить область научных исследований, к которой относится то или иное произведение. Кроме того, ключевые слова можно считать классификационными признаками, по которым целесообразно проводить поиск необходимого информационного научного источника.

Ключевые слова являются обязательными составляющими любого научного источника, поэтому формулировка ключевых слов, а также выбор их количества являются важным аспектом при разработке структуры научного произведения. Раздел «Ключевые слова» является обязательным в разрабатываемых стандартах начиная с 1992 г. Поиск необходимого нормативного документа в существующих поисковых системах можно осуществлять по ключевым словам. Целью исследования является анализ степени соответствия формулировок ключевых слов содержанию стандартов.

Для проведения исследования были выбраны стандарты различных трех классификационных групп из трех классификационных разделов Общероссийского классификатора стандартов ОК 001–2021. Авторами была предложена система показателей, позволяющих количественно оценить эффективность использования ключевых слов в названии и тексте стандарта; проведена статистическая обработка данных об использовании ключевых слов в названии и тексте стандарта; рассчитаны коэффициенты, позволяющие численно оценить ситуацию по параметру, все ли официально назначенные ключевые слова были использованы хотя бы один раз в названии или тексте стандарта. Более того, в работе был рассчитан коэффициент, показывающий частоту использования официально назначенных ключевых слов в тексте стандарта.

Полученные результаты свидетельствуют, что официально назначенные ключевые слова в слабой степени идентифицируют стандарт, в результате чего поиск необходимого нормативного документа в поисковых системах будет неэффективен.

Ключевые слова: ключевое слово, стандарт, содержание, информация, поиск, коэффициент использования ключевого слова

Для цитирования: Казанцева Т. В., Казанцева Н. К., Полякова М. А., Александров В. А., Параскивая Е. О. Количественная оценка уровня соответствия назначенных ключевых слов содержанию стандарта. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 22–31. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-22-31>. EDN: NNCIYL.



© Казанцева Т. В., Казанцева Н. К., Полякова М. А.,
Александров В. А., Параскивая Е. О., 2026.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE CONFORMITY LEVEL OF OFFICIALLY ASSIGNED KEYWORDS TO THE STANDARD CONTENT

T. V. Kazantseva¹, N. K. Kazantseva¹, M. A. Polyakova²✉, V. A. Alexandrov³, E. O. Paraskivaya¹

¹Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Mira St., 19, Ekaterinburg, 620062, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Lenina Ave., 38, Magnitogorsk, 455000, Russia

³Ural State Agrarian University, Karla Libknekhta St., 42, Ekaterinburg, 620000, Russia

✉ m.polyakova-64@mail.ru

Keywords are currently used in scientific literature as one of the identifying features that helps determine the field of scientific research. Furthermore, keywords can be considered classification features for searching the required scientific information source.

Keywords are essential components of any scientific source, therefore, the formulation of keywords, as well as the choice of their number, are an important aspect in developing the structure of a scientific work. The "Keywords" section has been obligatory in the standards being developed since 1992. The search for the necessary regulatory document in existing search engines can be carried out by keywords. The aim of the research is to analyse the degree to which the formulations of keywords correspond to the content of the standards.

The authors consider standards of three different classification groups from three sections of the All-Russian Classifier of Standards OK 001–2021. Moreover, the authors propose a system of indicators to quantify the effectiveness of using keywords in the title and text of the standard; conduct statistical processing of data on the keywords usage in the title and text of the standard; calculate coefficients that allow numerically assessing the situation based on the parameter whether all officially keywords are used at least once in the title or text of the standard. The research also calculates a coefficient showing the frequency of the officially assigned keywords usage in the text of the standard.

The results indicate that officially assigned keywords poorly identify the standard, as a result of which the search for the necessary regulatory document is ineffective.

Keywords: keyword, standard, content, information, search, coefficient of the keyword application

For citation: Kazantseva T. V., Kazantseva N. K., Polyakova M. A., Alexandrov V. A., Paraskivaya E. O. Quantitative assessment of the conformity level of officially assigned keywords to the standard content. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):22–31. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-22-31>. EDN: NNCIYL. (In Russ.).



© Kazantseva T. V., Kazantseva N. K., Polyakova M. A., Alexandrov V. A., Paraskivaya E. O., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Стандартизация как наука является отражением существующей системы экономических отношений между производителями и потребителями в области качества продукции или услуг. Результаты стандартизации оцениваются теми изменениями, которые она вносит в народное хозяйство. Стандартизация базируется на общенаучных и специфических методах. К общенаучным методам относят упорядочение объектов стандартизации и параметрическую стандартизацию. Упорядочение как управление многообразием связано, прежде всего, с сокращением многообразия. Одним из видов упорядочения является систематизация объектов, сущность которой заключается в научно обоснованном, последовательном классифицировании и ранжировании совокупности конкретных объектов.

Одной из основных прикладных целей стандартизации является создание и систематическое обновление существующего фонда стандартов.

Стандарты, в отличие от обычных источников информации и в соответствии со своим назначением, способны быстро изменяться, становиться проводниками инновационных решений, при этом оставаясь в общей сбалансированной системе требований к объектам стандартизации, обеспечиваемой комплексной стандартизацией. К признакам, которые могут быть использованы для ранжирования и систематизации стандартов, относятся ключевые слова.

Понятие «ключевое слово» начало активно использоваться во второй половине XX в., когда появились первые электронные поисковые системы. Ключевые слова представляют собой семантически значимые элементы текста, которые в концентрированной форме передают основную смысловую нагрузку данного текста^{1,2}. Сам термин «ключевое слово» достаточно новый, и, по мнению специалистов-филологов, «понятие “ключевое слово” на сегодняшний день является не вполне отрефлек-

тированным в лингвистике, и оно только начинает входить в научный оборот» [1]. С практической точки зрения, «ключевое слово» — это инструмент поиска, который широко используют для получения интересующей пользователя информации [1–5].

Первые практики применения официально назначенных ключевых слов в стандарте появились в 90-е гг. XX в., когда в 1992 г. был принят национальный стандарт ГОСТ Р 1.5–92, который в настоящее время заменен на ГОСТ Р 1.5–2012 «Стандартизация в РФ. Стандарты национальные. Правила построения, изложения и обозначения»³. Согласно данному стандарту, ключевые слова являются обязательным элементом библиографических данных документа. Все стандарты, принятые после 1992 г., содержат перечень официально назначенных ключевых слов.

Понятие «ключевые слова» в стандарте в силу особого статуса таких документов используются для обозначения основных тем, понятий или спецификаций, которые необходимо учитывать при разработке или интерпретации стандарта, поэтому грамотное использование ключевых слов в поисковых системах способно представить стандарт как вполне конкретный документ [6–9]. Поскольку разработчиком национального стандарта может быть любое физическое лицо (Федеральный закон «О техническом регулировании» № 184-ФЗ, ст. 16), формулирование ключевых слов и их выбор являются неотъемлемой частью процесса разработки стандарта. Официально назначенные ключевые слова, указанные в стандарте, должны соответствовать терминологии, используемой в соответствующей отрасли или сфере деятельности, а также должны отражать технические требования к объекту стандартизации, аспекты регулирования данным объектом и другие важные характеристики. Правильный выбор ключевых слов в стандарте — это важная и ответственная процедура, которая способна облегчить поиск, понимание и применение документов в соответствующей области [9–14].

В рамках своей деятельности любая организация использует большое количество стандартов разных категорий: национальных, межгосударственных, международных, а также стандартов организации самого предприятия, правил, рекомендаций и других нормативных документов. По самым скромным оценкам национальный фонд стандартов в настоящее время насчитывает свыше 50 000 документов, при этом количество документов увеличивается, и для использования такой базы данных требуются принципиально новые технологии обслуживания [6–9].

В настоящее время имеется достаточно большое количество информационных систем, работающих в области стандартизации. К основным источникам профессиональной информации о национальных стандартах можно отнести следующие информационные системы [11, 15, 16]:

— Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), официальный сайт www.rst.gov.ru;

— Российский институт стандартизации, официальный сайт www.gostinfo.ru;

— группа компаний «ТЕХЭКСПЕРТ», ресурс по подписке;

— электронная база ГОСТов, официальный сайт 1000gost.ru.

В действующих информационных системах применяются различные методы идентификации нормативных документов: по кодам общероссийского классификатора стандартов ОК 001–2021, по названию стандарта и по ключевым словам. В некоторых случаях поиск по ключевым словам — это единственный способ идентификации стандартов в большой базе нормативных документов. Однако соответствие официально назначенных ключевых слов содержанию стандарта для обеспечения цели поиска и идентификации стандарта до настоящего времени практически не исследовалось [15–18].

Целью исследования является оценка степени соответствия официально назначенных ключевых слов, предназначенных для поиска стандарта, содержанию данного стандарта.

Методы исследования

Для эксперимента случайным образом были выбраны стандарты из трех классификационных групп трех классификационных разделов в соответствии с Общероссийским классификатором стандартов ОК 001–2021:

— классификационная группа 17.040 — Линейные и угловые размеры, раздел 17 — Метрология и измерения. Физические явления;

— классификационная группа 35.240 — Применение информационных технологий, раздел 35 — Информационные технологии;

— классификационная группа 77.240 — Цветные металлы, раздел 77 — Металлургия.

Перечень случайно отобранных стандартов приведен в табл. 1. В процессе исследования использовали специальные методы стандартизации и статистические методы обработки экспериментальных данных.

В процессе исследования были выделены следующие характеристики использования ключевых слов в стандарте:

— общее количество официально назначенных ключевых слов;

— общее количество слов в названии стандарта;

— общее количество слов в тексте стандарта без названия и приложений;

— количество официально назначенных ключевых слов, использованных в названии стандарта;

— количество официально назначенных слов, использованных в тексте стандарта;

— сумма всех повторений официально назначенных ключевых слов, использованных в тексте стандарта;

— максимальное повторение одного официально назначенного ключевого слова в тексте стандарта.

Также рассматривались относительные характеристики. Для оценки различных аспектов эффек-

¹Лингвистический энциклопедический словарь / гл. ред. В. Н. Ярцева. Москва: Большая Российская энциклопедия, 2002. 707 с.

²Жеребило Т. В. Словарь лингвистических терминов. Назрань: ООО «Пилигрим», 2010. 486 с. ISBN 978-5-98993-133-0. EDN: RUSOUC.

³ГОСТ Р 1.5–2012 Стандартизация в РФ. Национальные стандарты. Правила построения, изложения, оформления и обозначения. Москва: Стандартинформ, 2013. 27 с.

Таблица 1. Перечень стандартов, отобранных для оценки соответствия официально отобранных ключевых слов содержанию стандартов

Table 1. List of standards selected for assessment of compliance of officially assigned keywords with the content of the standards

Код классификационной группы	Обозначение стандарта	Наименование стандарта
17.040	ГОСТ 4.446–86	Система показателей качества. Средства измерения и контроля линейных и угловых размеров в машиностроении. Номенклатура показателей
	ГОСТ 162–90	Штангенглубиномеры. Технические условия
	ГОСТ 7470–92	Глубиномеры микрометрические. Технические условия
	ГОСТ Р 51918–2002	Проекциометры макшейдерские. Общие технические требования и методы испытаний
	ГОСТ Р 8. 862–2013	Государственная система обеспечения единства измерений. Толщинометры ультразвуковые. Методика поверки
	ГОСТ 25575–2014	Калибры для соединений с трапецидальной резьбой обсадных труб и муфт к ним. Типы и основные размеры
	ГОСТ Р 8.1012–2022	Государственная система обеспечения единства измерений. Счетчики воды. Методика поверки
	ГОСТ 34854–2022	Калибры для соединений с конической резьбой обсадных насосно-компрессорных, буровых и трубопроводных труб. Методы измерений геометрических параметров
35.240	ГОСТ Р 57700.19–2010	Численное моделирование динамических рабочих процессов в социотехнических системах. Требования к архитектуре процессов
	ГОСТ Р 51725.12–2014	Каталогизация продукции для федеральных государственных нужд. Порядок регистрации разработчиков, изготовителей и поставщиков продукции для федеральных нужд
	ГОСТ Р 51725.3–2016	Каталогизация продукции для федеральных государственных нужд. Правила идентификации и классификации продукции. Общие положения
	ГОСТ Р 70370–2022	Системы промышленной автоматизации и интеграции. Управление устареванием. Требования к процессам информационного обмена для учета изменений номенклатуры продукции и непрерывности производства
	ГОСТ Р 71063–2023	Информационные технологии. Робототехнические комплексы. Интероперабельность. Общие положения
77.120	ГОСТ 4658–73	Ртуть. Технические условия
	ГОСТ 12556.2–82	Сплавы платино-родиевые. Методы спектрального анализа
	ГОСТ 13637.1–93	Галлий. Атомно-эмиссионный метод определения алюминия, висмута, железа, кремния, магния, марганца, меди, никеля, олова, свинца, хрома и цинка
	ГОСТ 53372–2009	Золото. Методы анализа
	ГОСТ 31921–2012	Припой для капиллярной пайки фитингов из меди и медных сплавов для соединения систем трубопроводов
	ГОСТ 34776–2021	Редкоземельные металлы. Термины и определения

тивности использования ключевых слов в тексте стандарта авторами предложены четыре различных коэффициента.

Коэффициент α — коэффициент использования ключевых слов в названии стандарта, который представляет отношение количества фактически использованных в названии стандарта ключевых слов к общему количеству официально назначенных ключевых слов (в %).

Коэффициент β — коэффициент использования ключевых слов в тексте стандарта, который представляет отношение количества фактически использованных в тексте стандарта ключевых слов к общему количеству официально назначенных ключевых слов (в %).

Коэффициент μ — коэффициент интенсивности использования ключевых слов в тексте стандарта, который представляет отношение суммы всех по-

вторений в тексте стандарта официально назначенных ключевых слов к общему количеству слов в стандарте, за исключением количества слов в названии стандарта (в %).

Краткое описание выбранных показателей эффективности использования ключевых слов в тексте стандарта приведены в табл. 2.

Полученные результаты и обсуждение

Сведения об использовании официально назначенных ключевых слов в выбранных стандартах приведены в табл. 3, с учетом обозначений характеристик выбранных показателей эффективности использования ключевых слов в тексте стандарта (см. табл. 2).

На рис. 1–3 приведены показатели использования официально назначенных ключевых слов в названии и в тексте стандартов, а также интен-

Таблица 2. Характеристика выбранных показателей эффективности использования ключевых слов в тексте стандарта
Table 2. Features of the selected indicators efficiency for the keywords usage in the text of the standard

Обозначение показателя	Наименование показателя	Единица измерения	Формула для расчета показателя
<i>A</i>	Общее количество слов в стандарте	шт.	Определяется экспериментально
<i>B</i>	Общее количество слов в названии стандарта	шт.	Определяется экспериментально
<i>C</i>	Общее количество официально назначенных ключевых слов в стандарте	шт.	Определяется экспериментально
<i>D</i>	Количество фактически использованных официально назначенных ключевых слов в названии стандарта	шт.	Определяется экспериментально
<i>F</i>	Количество фактически использованных официально назначенных ключевых слов в тексте стандарта	шт.	Определяется экспериментально
<i>G</i>	Сумма всех повторений официально назначенных ключевых слов в тексте стандарта	шт.	Определяется экспериментально
α	Коэффициент использования ключевых слов в названии стандарта	%	$\alpha = \frac{D}{C} 100\%$
β	Коэффициент использования ключевых слов в тексте стандарта	%	$\beta = \frac{F}{C} 100\%$
μ	Коэффициент интенсивности использования ключевых слов	%	$\mu = \frac{G}{A - B} 100\%$

Таблица 3. Сведения о количестве официально назначенных ключевых слов в стандартах
Table 3. Information on the number of officially assigned keywords in standards

Код классификационной группы	Обозначение стандарта	Общее количество слов, шт.			Сумма всех повторений официально назначенных ключевых слов в тексте стандарта, <i>G</i> , шт.	Использование ключевых слов, %		Интенсивность использования ключевых слов, коэффициент μ , %
		в тексте стандарта, <i>A</i>	в названии стандарта, <i>B</i>	официально назначенных ключевых слов		в названии стандарта, коэффициент α	в тексте стандарта, коэффициент β	
17.040	ГОСТ 4.446 – 86	3117	16	3	2	100	33,3	0,03
	ГОСТ 162 – 90	1623	3	2	0	50	0,0	0,00
	ГОСТ 7470 – 92	1569	4	3	54	66,7	33,3	3,45
	ГОСТ Р 51918 – 2002	3775	8	6	11	33,3	100	0,29
	ГОСТ Р 8.862 – 2013	1346	9	3	67	66,7	100	0,44
	ГОСТ 25575 – 2014	2212	16	12	43	8,3	66,7	1,96
	ГОСТ Р 8.1012 – 2022	3767	9	8	37	12,5	100	0,98
35.240	ГОСТ 34854 – 2022	20524	15	8	136	50	62,5	0,66
	ГОСТ Р 57700.19 – 2010	1921	10	11	46	27,3	81,8	2,40
	ГОСТ Р 51725.12 – 2014	1029	17	8	122	62,5	87,5	12,06
	ГОСТ Р 51725.3 – 2016	1551	13	6	106	50	100	6,89
	ГОСТ Р 70370 – 2022	3612	20	4	1	25	0,0	0,00
	ГОСТ Р 71063 – 2023	2782	7	7	26	0,0	42,8	0,94
77.120	ГОСТ 4658 – 73	1903	3	8	22	12,5	62,5	1,16
	ГОСТ 12556.2 – 82	671	5	6	6	33,3	50	0,90
	ГОСТ 13637.1 – 93	1872	15	2	1	0,0	50	0,05
	ГОСТ 53372 – 2009	12585	3	11	25	18,2	54,5	0,20
	ГОСТ 31921 – 2012	934	14	11	40	27,3	54,5	4,28
	ГОСТ 34776 – 2021	2224	4	5	63	40,0	80,0	2,83

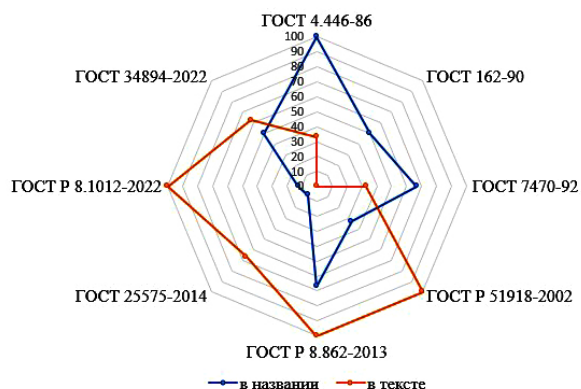


Рис. 1. Использование официально назначенных ключевых слов для стандартов классификационной группы 17.040, коэффициенты α и β

Fig. 1. Officially assigned keywords usage for standards of the 17.040 classification group, α and β coefficients

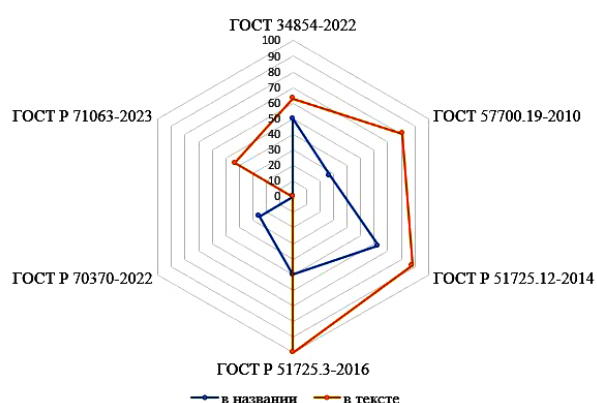


Рис. 2. Использование официально назначенных ключевых слов для стандартов классификационной группы 35.240, коэффициенты α и β

Fig. 2. Officially assigned keywords usage for standards of the 35.240 classification group, α and β coefficients

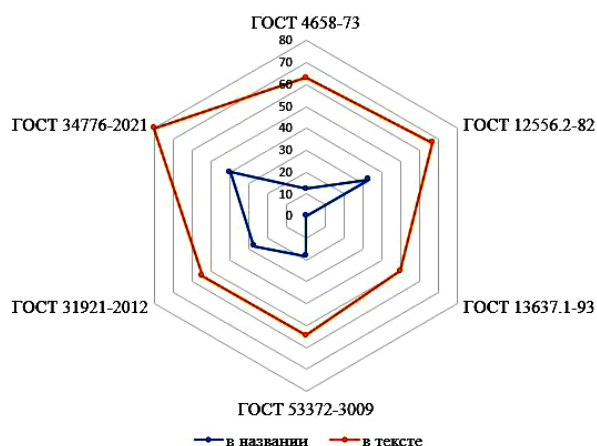


Рис. 3. Использование официально назначенных ключевых слов для стандартов классификационной группы 77.120, коэффициенты α и β

Fig. 3. Officially assigned keywords usage for standards of the 77.120 classification group, α and β coefficients

сивности их применения для рассматриваемых стандартов из ключевых слов классификационных групп 17.040, 35.240 и 77.120.

На рис. 1 приведена диаграмма использования официально назначенных ключевых слов в названии и тексте стандартов из классификационной группы 17.040 — Линейные и угловые размеры. В данной группе представлено 7 стандартов. Общее количество слов в выбранных стандартах изменялось в диапазоне от 1569 до 3767 слов.

Только у одного стандарта ГОСТ 4.446–86 все три официально назначенных ключевых слова использованы в тексте стандарта и его названии, максимальное использование официально назначенного ключевого слова составляет всего 2 раза на 3117 слов стандарта. У ГОСТ Р 8.862–2013 из трех официально назначенных ключевых слов в названии стандарта использовано 2 слова, в тексте стандарта использованы все 3 слова, а максимальное использование одного официально назначенного ключевого слова составляет 36 раз на 1346 слов. У остальных стандартов рассматриваемой классификационной группы ключевых слов как в тексте стандарта, так и в его названии использована только часть официально назначенных слов. Так, для ГОСТ Р 8.1012–2022 из 8 официально назначенных ключевых слова в тексте стандарта использовано только 4 слова, а в названии — одно слово. Максимальное количество использования одного ключевого слова составляет 27 раз. Для ГОСТ 25575–2014 из 12 официально назначенных ключевых слов в тексте стандарта использовано 7 слов, а в названии — 2 слова. При этом максимальное количество использования одного ключевого слова составляет всего 8 раз на 2212 слов.

Коэффициенты α и β характеризуют интенсивность использования официально назначенных ключевых слов. Для группы стандартов 17.040 значение коэффициента α колеблется от 100 до 8,3 %, при этом преобладают стандарты с показателем $\alpha > 50$ %. Коэффициент β , характеризующий использование ключевых слов в тексте стандарта, имеет в среднем более высокие значения, чем α . У трех стандартов, а именно ГОСТ Р 51918–2002, ГОСТ Р 8.862–2013 и ГОСТ Р 8.1012–2022, показатель $\beta = 100$ %. При этом интенсивность использования ключевых слов составляет от 0 до 1,96 %.

На рис. 2 приведена диаграмма использования официально назначенных ключевых слов в названии и тексте стандартов из классификационной группы 35.240 — Применение информационных технологий. В данной группе представлено 6 стандартов. Общее количество слов в выбранных стандартах изменялось в диапазоне от 20524 до 1029 слов.

В данной группе только у одного стандарта ГОСТ Р 51725.3–2016 все официально назначенные ключевые слова хотя бы один раз были использованы в тексте стандарта, при этом максимально использовалось отдельно слово 34 раза. Все ключевые слова были использованы в тексте стандарта 106 раз, а общее количество слов в стандарте составляет 1029. Во всех остальных стандартах данной квалификационной группы официально назначенные ключевые слова использовались от одного до 6 раз, что составляет от 25 % до 70 % их использования. Так, у ГОСТ Р 70370–2022 из 4 официально назначенных ключевых слов в тексте стандарта использовано только одно ключевое слова 3 раза, а общее количество слов в стандарте составляет 3612. Однако интенсивность использования ключевых слов преимущественно менее 3 %.

У группы стандартов 35.240 использование ключевых слов в названии стандарта имеет те же тен-

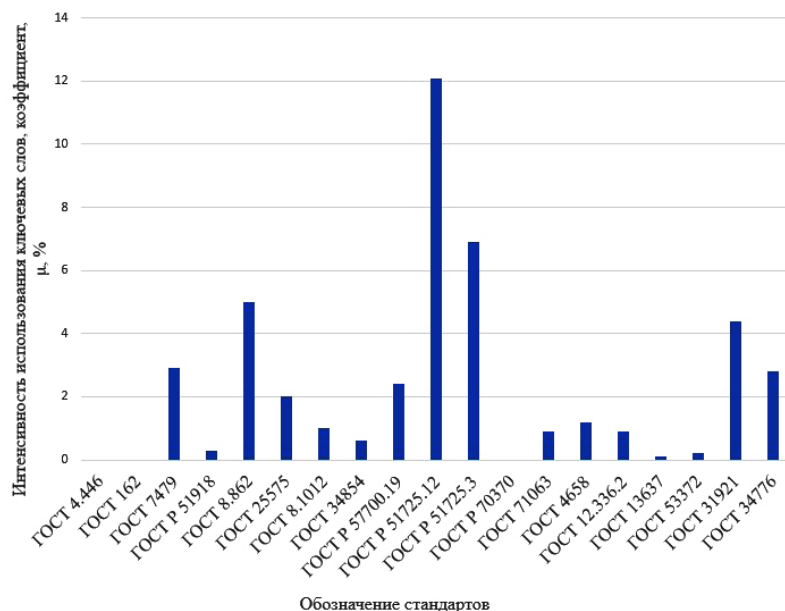


Рис. 4. Отношение всех встречающихся официально назначенных ключевых слов с учетом повторов к общему количеству слов в стандарте за исключением наименования

Fig. 4. Ratio of all officially assigned keywords including repetitions to the total number of words in the standard except the title

денции, что и для группы стандартов 17.040. При этом применение ключевых слов в тексте стандарта выше, чем в названии этих же стандартов, $\alpha < \beta$, несмотря на то, что у одного стандарта, ГОСТ Р 70370 – 2022, $\beta = 0$. Интенсивность использования официально назначенных ключевых слов в стандарте для данной группы изменяется от 0 до 12 %.

На рис. 3 приведена диаграмма использования официально назначенных ключевых слов в названии и тексте стандартов из классификационной группы 77.120 — Цветные металлы. В данной группе представлено 6 стандартов. Общее количество слов в выбранных стандартах изменяется в диапазоне от 671 до 12585 слов.

В данной группе нет ни одного стандарта, в котором были бы использованы все официально назначенные ключевые слова. В ГОСТ 13637.1 – 93 из двух официально назначенных ключевых слова в тексте стандарта использовано только одно слово. Более того, в тексте стандарта оно было использовано 10 раз из общего количества слов в стандарте, которое составило 1872. В ГОСТ 12556.2 – 82 из 6 официально назначенных ключевых слов в тексте стандарта и в названии стандарта было использовано только 2 слова, а максимальное число использования официально назначенных ключевых слов в стандарте составляет всего 2 раза при общем количестве слов в стандарте — 671. Аналогичная картина наблюдалась и для ГОСТ 34774 – 2021: из 6 официально назначенных ключевых слов в тексте стандарта было использовано только 4 слова, а максимальное число использования одного официально назначенного ключевого слова в стандарте составляет 8 раз при общем количестве слов в стандарте 2224. В ГОСТ 53372 – 2009 из 11 официально назначенных слов в тексте стандарта использовано 6 слов, максимальная частота использования одного ключевого слова в тексте стандарта составляет 11 раз при общем количестве слов в стандарте — 12585.

Для группы стандартов 77.120 прослеживается общая тенденция использования официально на-

значенных ключевых слов стандартов групп 17.040 и 35.240, $\alpha < \beta$, хотя абсолютные значения этих коэффициентов несколько ниже, чем у стандартов группы 17.040 и группы 35.240.

Коэффициенты α и β характеризуют тот факт, использованы ли все официально назначенные ключевые слова хотя бы один раз в названии или тексте стандарта. Для группы стандартов 17.040 значение коэффициента α колеблется от 100 до 8,3 %, а преобладают стандарты с показателем $\alpha > 50$ %. Коэффициент β , характеризующий использование ключевых слов в тексте стандарта, имеет в среднем более высокие значения, чем α . У трех стандартов (ГОСТ Р 51918 – 2002, ГОСТ Р 8.862 – 2013 и ГОСТ Р 8.1012 – 2022) показатель $\beta = 100$ %.

У группы стандартов 35.240 использование ключевых слов в названии стандарта имеет те же тенденции, что и для группы стандартов 17.040. При этом использование ключевых слов в тексте стандарта выше, чем в названии этих же стандартов, $\alpha < \beta$, несмотря на то, что у одного стандарта (ГОСТ Р 70370 – 2022) $\beta = 0$.

Для группы стандартов 77.120 прослеживается общая тенденция стандартов групп 17.040 и 35.240, $\alpha < \beta$, хотя абсолютные значения этих коэффициентов несколько ниже, чем у стандартов группы 17.040 и группы 35.240.

Наиболее важным показателем эффективности применения ключевых слов является коэффициент μ , иллюстрирующий частоту использования официально назначенных ключевых слов в тексте стандарта (рис. 4).

На рис. 5 приведена диаграмма распределения стандартов по показателю μ .

Из девятнадцати рассмотренных стандартов в тексте трех стандартов нет ни одного официально утвержденного ключевого слова (ГОСТ 4.446 – 86, ГОСТ 162 – 80, ГОСТ Р 70370 – 2022), у семи стандартов данный показатель изменяется в интервале от 0 до 1 % (ГОСТ Р 51918 – 2002, ГОСТ Р 8.1012, ГОСТ 34854 – 2022, ГОСТ Р 71063 – 2023, ГОСТ

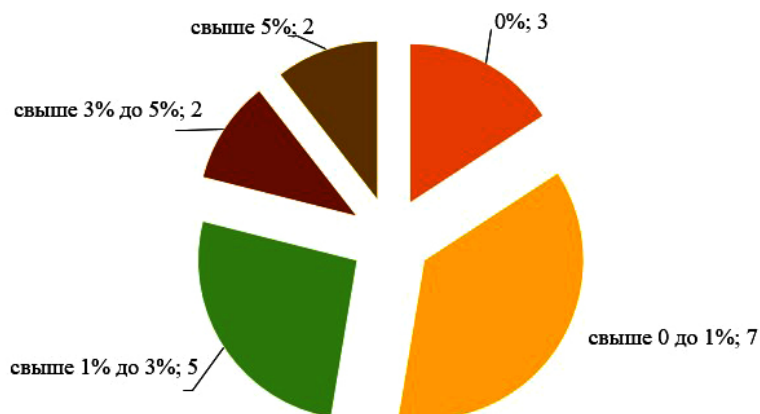


Рис. 5. Распределение стандартов по величине интенсивности использования официально назначенных ключевых слов с учетом повторов в стандарте к общему количеству слов в стандарте за исключением наименования

Fig. 5. Distribution of standards by intensity of the officially assigned keywords usage including repetitions to total number of words in the standard except the title

12556–82, ГОСТ 13637–1–93, ГОСТ 53372–2009), значения μ в интервале от 1 до 3 % наблюдается у пяти стандартов (ГОСТ 7470–92, ГОСТ 25575–2014, ГОСТ Р 57700.19–2010, ГОСТ 4658–73, ГОСТ 3477–2021) и только у двух стандартов (ГОСТ Р 51725.12–2014, ГОСТ Р 51725.3–2016) рассматриваемый показатель превышает 5 %.

Выводы

Полученные результаты анализа количественных оценок эффективности использования официально назначенных ключевых слов у девятнадцати случайным образом отобранных стандартов из трех классификационных групп ОК 001–2021 трудно назвать соответствующими официальному назначению ключевых слов. Возникла ситуация, когда пользователь грамотно выбирает ключевые слова, исходя из цели своего поиска, но не может получить адекватный результат, так как официально назначенные ключевые слова не отражают содержание стандарта. Большая часть рассмотренных стандартов весьма слабо может быть идентифицирована с помощью выбранных ключевых слов.

Необходимо проведение более глубокого анализа по соответствию официально назначаемых ключевых слов содержанию стандарта. Другим действенным механизмом, позволяющим повысить эффективность и результативность поиска необходимого стандарта по ключевым словам, является использование методики назначения ключевых слов с установлением пороговых значений разработанных в данном исследовании коэффициентов. Указанное направление является перспективным для дальнейших теоретико-экспериментальных исследований.

С другой стороны, современные приемы выбора ключевых слов (использование лексических баз данных, алгоритмов частотности и веса слов, семантических характеристик слов, кластеров слов) могут стать эффективным инструментом для повышения степени их соответствия содержанию стандарта.

Список источников / References

1. Попова Л. А. Ключевые слова современности: проблема термина // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2017. № 5 (166). С. 93–97. EDN: ZEHLBB.

Popova L. A. Keywords of modern times: the issue of the term. *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2017;5(166):93–97. EDN: ZEHLBB. (In Russ.).

2. Krasteva R. D. Standardization and Standards in Bulgarian Libraries: Current State. *Journal of Librarianship and Information Science*. 2019;52(3):726–737. <https://doi.org/10.1177/0961000619871603>.

3. Celardo L., Everett M. G. Network text analysis: A two-way classification approach. *International Journal of Information Management*. 2020;51:102009. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.09.005>. EDN: YQRNDY.

4. Зажигалкин А. В. Анализ зарубежного опыта организационных структур стандартизации // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2020. № 5 (57). С.34–46. EDN: TDTEUM.

Zazhigalkin A. V. Analiz zarubezhnogo opyta organizatsionnykh struktur standartizatsii. *Informatsionno-Ekonomicheskie Aspekty Standartizatsii i Tekhnicheskogo Regulirovaniya*. 2020;5(57):34–46. EDN: TDTEUM. (In Russ.).

5. Исаев И. В. Современные инструменты поддержки НИОКР (R&D) для инновационного развития транспортных компаний // Экономика и финансы. 2024. № 3 (112). С. 3–7.

Isaev I. V. Sovremennye instrumenty podderzhki NIOKR (R&D) dlya innovatsionnogo razvitiya transportnykh kompanij. *Ekonomika i Finansy*. 2024;3(112):3–7. (In Russ.).

6. Gandomi A., Haider M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*. 2015;35(2):137–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007>.

7. Tulloch B. J., Kaczmarek M., Shankar S., Nathan L. When words are key: negotiating meaning in information research. *Journal of Documentation*. 2024;80(7):187–205. <https://doi.org/10.1108/JD-05-2023-0103>. EDN: TODPRF.

8. Wang R., Liu W., McDonald C. Using Word Embeddings to Enhance Keyword Identification for Scientific Publications. *Proceedings of the Australasian Database Conference*. 2015:257–268.

9. Wei L., Zhifeng L., Yong H. et al. How do authors select keywords? A preliminary study of author keyword selection behavior. *Journal of Informetrics*. 2020;14(4):101066. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2020.101066>.

10. Verma G., Kanrar S. Secure Keyword Search over Encrypted Cloud Data Using Blockchain in Digital Document Sharing. *Wireless Personal Communications*. 2024;134:975–996. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-10947-1>.

11. Побединский В. В., Полякова М. А., Казанцева Т. В. [и др.]. Интеллектуальная система поиска нормативных до-

кументов с использованием основных подходов нечеткой логики // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2024. Т. 22, № 1. С. 107 – 113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-107-113>. EDN: XJGJSV.

Pobedinskiy V. V., Polyakova M. A., Kazantseva T. V. [et al.]. An intelligent system based on main approaches of fuzzy logic for searching for regulatory documents. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2024;22(1):107 – 113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-107-113>. EDN: XJGJSV. (In Russ.).

12. Саламатов В. Ю., Ватолкина Н. Ш., Дробышев Д. А. [и др.]. Цифровая трансформация стандартизации: препятствия и вызовы // Стандарты и качество. 2023. № 4. С. 34 – 39. EDN: ISBXDQ.

Salamatov V. Yu., Vatulkina N. Sh., Drobyshev D. A. [et al.]. Digital transformation of standardization: obstacles and challenges. *Standards and Quality*. 2023;4:34 – 39. EDN: ISBXDQ. (In Russ.).

13. Головаш А. Н., Курманова Н. Б., Полеваев В. В. Терминология в стандартах и качество продукции. Причинно-следственные связи // Стандарты и качество. 2024. № 10. С. 40 – 43. <https://doi.org/10.35400/0038-9692-2024-10-102-24>. EDN: ZBMENY.

Golovash A. N., Kurmanova N. B., Polevaev V. V. Terminology in standards and product quality: causal relationships. *Standards and Quality*. 2024;10:40 – 43. <https://doi.org/10.35400/0038-9692-2024-10-102-24>. EDN: ZBMENY. (In Russ.).

14. Глущенко О. А., Хабибуллин Р. Р., Макеева А. Ю. «Тех-эксперт»: умный подход к управлению нормативными и техническими документами // Стандарты и качество. 2024. № 2. С. 42 – 45. EDN: GTBEUV.

Glushchenko O. A., Khabibullin R. R., Makeeva A. Yu. Techexpert: a smart approach to the regulatory and technical documents management. *Standards and Quality*. 2024;2:42 – 45. EDN: GTBEUV. (In Russ.).

15. Казанцева Т. В., Полякова М. А. Направления работ по цифровизации в области стандартизации // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. 2021. № 20. С. 246 – 249.

Kazantseva T. V., Polyakova M. A. Napravleniya rabot po tsifrovizatsii v oblasti standartizatsii. *Technologies of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing*. 2021;20:246 – 249. (In Russ.).

16. Полякова М. А., Казанцева Т. В., Казанцева Н. К., Пиджакова Е. Н. Количественная оценка информации как основа построения базы данных // Черная металлургия. 2022. Т. 78, № 4. С. 338 – 344. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2022-4-338-344>. EDN: QVVFBB.

Polyakova M. A., Kazantseva T. V., Kazantseva N. K., Pidzhakova E. N. Kolichestvennaya otsenka informatsii kak osnova postroeniya bazy dannykh. *Chernaya metallurgiya*. 2022;78(4):338-344. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2022-4-338-344>. EDN: QVVFBB. (In Russ.).

17. Казанцева Т. В., Полякова М. А., Казанцева Н. К. [и др.]. Комплекс задач при создании электронной библиотеки стандартов // Качество и жизнь. 2021. № 4. С. 42 – 46. <https://doi.org/10.34214/2312-5209-2021-32-4-42-46>. EDN: DDKHIB.

Kazantseva T. V., Polyakova M. A., Kazantseva N. K. [et al.]. Kompleks zadach pri sozdanii elektronnoy biblioteki standartov. *Quality and Life*. 2021;4:42-46. <https://doi.org/10.34214/2312-5209-2021-32-4-42-46>. EDN: DDKHIB. (In Russ.).

18. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An introduction to statistical learning. New York, NY, USA: Springer, 2013.

Вклад авторов:

Т. В. Казанцева. Постановка цели и задач исследования; разработка системы показателей, оценивающих эффективность использования официально

назначенных ключевых слов стандарта; проведение анализа степени соответствия формулировок ключевых слов содержанию стандарта с использованием разработанной системы показателей; формулировка выводов и подготовка материалов статьи.

Н. К. Казанцева. Проведение обзора литературы; постановка целей и задач исследования; разработка системы показателей, оценивающих эффективность использования официально назначенных ключевых слов стандарта; формулировка выводов и подготовка материалов статьи.

М. А. Полякова. Постановка цели и задач исследования; разработка системы показателей, оценивающих эффективность использования официально назначенных ключевых слов стандарта; расчет ряда коэффициентов полученных результатов.

В. А. Александров. Проведение обзора литературы и статистической обработки, а также расчета ряда показателей разработанной системы оценки эффективности использования официально назначенных ключевых слов.

Е. О. Параскивая. Проведение статистической обработки и анализ полученных результатов; графическое оформление полученных результатов.

Authors' contribution:

Tatiana V. Kazantseva. Setting research goal and objectives; developing a system of indicators assessing the effectiveness of using officially assigned keywords of the standard; conducting the analysis of the degree of compliance of keywords with the content of the standard using the developed system of indicators; formulating conclusions and preparing the materials of the article.

Nadezhda K. Kazantseva. Conducting a literature review; setting research goals and objectives; developing a system of indicators assessing the effectiveness of using officially assigned keywords of the standard; formulating conclusions and preparing materials of the article.

Marina A. Polyakova. Setting research goal and objectives; developing a system of indicators to assess the effectiveness of using officially assigned keywords of the standard; calculating a number of coefficients of the obtained results.

Viktor A. Alexandrov. Conducting a literature review, statistical processing and calculating of the indicators number of the developed system for assessing the effectiveness of using officially assigned keywords.

Elizaveta O. Paraskivaya. Conducting the statistical processing and analysis of the obtained results; graphic presentation of the obtained results.

Информация об авторах:

КАЗАНЦЕВА Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург.

SPIN-код: 8626-7666

AuthorID (РИНЦ): 1011253

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7051-614X>

AuthorID (SCOPUS): 57204589419

e-mail: t.v.kazantseva@urfu.ru

КАЗАНЦЕВА Надежда Константиновна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Метрология, стандартизация и сертификация» УрФУ, г. Екатеринбург.

SPIN-код: 7336-9786

AuthorID (РИНЦ): 334604
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9430-9604>
AuthorID (SCOPUS): 57202829416
e-mail: n.k.kazantseva@urfu.ru

ПОЛЯКОВА Марина Андреевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Обработка материалов давлением имени М. И. Бояршинова» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск.
SPIN-код: 1789-5510

AuthorID (РИНЦ): 412344
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1597-8867>
AuthorID (SCOPUS): 36608826600
ResearcherID: A-6678-2014
e-mail: m.polyakova-64@mail.ru

АЛЕКСАНДРОВ Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология металлов и ремонт машин» Уральского государственного аграрного университета, г. Екатеринбург.

SPIN-код: 1239-9798
AuthorID (РИНЦ): 649295
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6637-7917>
AuthorID (SCOPUS): 57192382011
e-mail: alexandrov_vikt@mail.ru

ПАРАСКИВАЯ Елизавета Олеговна, магистрант кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация» УрФУ, г. Екатеринбург.

SPIN-код: 6132-3484
AuthorID (РИНЦ): 1276277
e-mail: elizaveta.paraskivaia@urfu.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025; одобрена после рецензирования 02.02.2026; принята к публикации 12.05.2026.

Information about the authors:

KAZANTSEVA Tatiana Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Metrology, Standardization, and Certification Department, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg.
SPIN-code: 8626-7666
AuthorID (RSCI): 1011253

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7051-614X>
AuthorID (SCOPUS): 57204589419
e-mail: t.v.kazantseva@urfu.ru

KAZANTSEVA Nadezhda Konstantinovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Metrology, Standardization, and Certification Department, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg.
SPIN-code: 7336-9786
AuthorID (RSCI): 334604

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9430-9604>
AuthorID (SCOPUS): 57202829416
e-mail: n.k.kazantseva@urfu.ru

POLYAKOVA Marina Andreyevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Materials Processing Department named after M. I. Boyarshinov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk.

SPIN-code: 1789-5510
AuthorID (RSCI): 412344
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1597-8867>
AuthorID (SCOPUS): 36608826600
ResearcherID: A-6678-2014

e-mail: m.polyakova-64@mail.ru

ALEKSANDROV Viktor Alekseyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Metal Technology and Machine Repair Department, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg.

SPIN-code: 1239-9798
AuthorID (RSCI): 649295
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6637-7917>
AuthorID (SCOPUS): 57192382011
e-mail: alexandrov_vikt@mail.ru

PARASKIVAYA Elizaveta Olegovna, Master's Student of the Metrology, Standardization, and Certification Department, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg.
SPIN-code: 6132-3484

AuthorID (RSCI): 1276277
e-mail: elizaveta.paraskivaia@urfu.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 24.10.2025; approved after reviewing 02.02.2026; accepted for publication 12.05.2026.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА РАБОЧИЕ ПЛОЩАДКИ АНТЕННО-МАЧТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ РАСЧЁТОВ

Ю. Д. Маркина 

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65

 poluektoff@bk.ru

В статье представлена методика поэлементного расчёта ветровой нагрузки на рабочие площадки антенно-мачтовых сооружений, рассматривающая ограждение как пространственную решётчатую конструкцию с индивидуальными аэродинамическими характеристиками элементов.

Актуальность исследования обусловлена высокой чувствительностью антенно-мачтовых сооружений к ветровым воздействиям и отсутствием формализованных методов расчёта нагрузок на вспомогательные элементы, вследствие чего в инженерной практике широко применяются упрощённые подходы, приводящие к существенным погрешностям. Цель работы состоит в повышении точности определения нормативной ветровой нагрузки на рабочие площадки и создании алгоритма, пригодного для интеграции в цифровые системы поддержки жизненного цикла сооружений.

Предложен алгоритм, реализованный в среде Microsoft Excel, включающий расчёт индивидуальных проекционных площадей, аэродинамических коэффициентов, коэффициента заполнения и поправочного коэффициента проницаемости. Выполнена апробация на реальной башне высотой 70 м и проведено сравнение с упрощённым методом эквивалентной площади. Показано, что упрощённый подход приводит к завышению нагрузки на 5–28 % и недооценке до –63 %.

Полученные результаты подтверждают научную и практическую значимость разработки и её перспективность для внедрения в комплексные отечественные системы автоматизации инженерных расчётов антенно-мачтовых сооружений.

Ключевые слова: башни, решётчатые конструкции, ветровая нагрузка, рабочие площадки, аэродинамические коэффициенты, автоматизация инженерных расчётов

Для цитирования: Маркина Ю. Д. Алгоритм оценки ветровой нагрузки на рабочие площадки антенно-мачтовых сооружений в условиях цифровизации расчётов. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 32–39. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-32-39>. EDN: SSZCZD.



© Маркина Ю. Д., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ALGORITHM FOR ASSESSING WIND LOADS ON WORKING PLATFORMS OF ANTENNA-MAST STRUCTURES UNDER CONDITIONS OF DIGITALIZED ENGINEERING ANALYSIS

Ju. D. Markina 

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Il'inskaya St., 65, Nizhny Novgorod, 603000, Russia

 poluektoff@bk.ru

The paper presents a computational approach for evaluating wind loads acting on working platforms of antenna-mast structures within the context of modern digitalized engineering workflows. The proposed method treats platform guardrails as spatial lattice systems and accounts for the individual aerodynamic behavior of each structural element.

The relevance of the research is proved by the high sensitivity of antenna-mast structures to wind and by the absence of standardized procedures for calculating loads on auxiliary components, which often forces engineers to rely on simplified estimations with limited accuracy. The aim is to improve the reliability of wind

load assessment for working platforms and to develop an algorithm suitable for integration into digital life-cycle support systems. The method involves elementwise calculation of projected areas, aerodynamic drag coefficients, filling ratio, and porosity-related correction factors.

The algorithm is implemented in Microsoft Excel to ensure transparency, reproducibility, and seamless adoption in engineering practice. An approbation was performed on a real tower with a height of 70 m and a comparison was made with a simplified method of equivalent area. As a result, the simplified approach leads to an overestimation of the load by 5–28% and an underestimation up to –63%.

Therefore, the results highlight the scientific and practical significance of the development and its prospects for implementation in complex domestic automation systems for engineering calculations of antenna-mast structures.

Keywords: towers, lattice systems, wind load, working platforms, aerodynamic coefficients, automated engineering analysis

For citation: Markina Ju. D. Algorithm for assessing wind loads on working platforms of antenna-mast structures under conditions of digitalized engineering analysis. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):32–39. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-32-39>. EDN: SSZCZD. (In Russ.).



© Markina Ju. D., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Антенно-мачтовые сооружения (АМС) относятся к числу наиболее распространённых и конструктивно сложных инженерных объектов телекоммуникационной инфраструктуры. Их работоспособность и надёжность в значительной степени определяются воздействием ветровой нагрузки, которая является доминирующим фактором при расчётах прочности и эксплуатационной безопасности. Ветровые воздействия способны формировать значительные изгибающие моменты, повышенные перемещения и колебания, что требует строгого учёта нормативных требований при проектировании и обследовании АМС в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

За последние десятилетия вопросам определения ветровых нагрузок на мачтовые и башенные сооружения посвящено значительное число исследований [1–4]. Работы, выполненные в РФ и за рубежом, охватывают широкий спектр задач — от анализа динамической реакции башен на ветровые порывы [5, 6] до уточнения аэродинамических коэффициентов для решётчатых конструкций [7, 8]. В ряде современных программных комплексов, в частности в SCAD Office (пакет плагинов РешК), реализованы инструменты автоматизированного сбора статической составляющей ветровой нагрузки на несущие элементы решётчатых конструкций. Активно развивается использование численного моделирования, включая методы крупномасштабной вихревой симуляции (LES) для оценки распределения локальных давлений на стержнях пространственных решёток сложной формы [9, 10].

Несмотря на значительный объём исследований, основное внимание уделяется несущей конструкции АМС, тогда как вспомогательные конструктивные элементы — рабочие площадки для обслуживания оборудования — остаются малоизученными. Ограждения рабочих площадок представляют собой пространственные решётчатые конструкции, аэродинамическое поведение которых отличается высокой неоднородностью по высоте и направлению ветра. В инженерной практике для ускорения расчётов часто используется упрощённая методика, основанная на суммировании эквивалентных сплошных площадей, когда суммарная проекция элементов ограждения приводится к единой площа-

ди, на которую затем прикладывается нормативное давление. Однако этот подход не учитывает форму и положение каждого элемента, различия в аэродинамических коэффициентах элементов, проницаемость решётчатой секции и зависимость распределения давления от направления ветра. В результате формируются ошибки, которые могут приводить либо к завышению усилий, либо, что опаснее, к их занижению.

Современный этап развития цифровых технологий и переход отрасли к концепции цифровой поддержки жизненного цикла изделия (ЖЦИ) актуализируют потребность в формализованных, автоматизированных и воспроизводимых методах расчёта ветровой нагрузки на такие локальные конструктивные элементы [11, 12]. В этом контексте важной задачей является разработка алгоритма, позволяющего выполнять расчёт ветровой нагрузки на рабочие площадки как на пространственные решётчатые системы, в полном соответствии с требованиями СП 20.13330.2016, но без применения трудоёмких ручных вычислений.

Настоящее исследование посвящено разработке и формализации алгоритма расчёта ветровой нагрузки на рабочие площадки АМС, в котором ограждение рассматривается как совокупность отдельных элементов с индивидуальными аэродинамическими и геометрическими характеристиками. Цель исследования — повысить точность определения ветровой нагрузки на рабочие площадки АМС и предложить алгоритм, пригодный для цифровизации расчётов в рамках ЖЦИ. Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Проанализирована специфика восприятия ветровой нагрузки решётчатыми ограждениями площадок.
2. Сформирован нормативно обоснованный алгоритм раздельного расчёта нагрузки на элементы ограждения.
3. Разработана автоматизированная Excel-реализация алгоритма.
4. Выполнена апробация алгоритма на эксплуатируемой башне и проведено сравнение с упрощённым методом эквивалентных площадей.
5. Оценены перспективы внедрения разработанного подхода в цифровые системы поддержки ЖЦИ.



Рис. 1. Укрупненный алгоритм автоматизированного сбора статической составляющей ветровой нагрузки на рабочие площадки АМС
Fig. 1. Generalized algorithm for automated collection of the static component of the wind load on working platforms of antenna-mast structures

Представленные в статье результаты направлены на повышение качества инженерных расчётов, уменьшение неопределённости при проектировании АМС и развитие инструментов цифровой инженерии.

Объект и методы исследования

Задача заключается в создании универсального алгоритма определения нормативной ветровой нагрузки, действующей на пространственную рабочую площадку, закреплённую на АМС, с учётом всех существенных факторов: высоты расположения, геометрических параметров площадки, аэродинамических коэффициентов отдельных элементов и нормативных требований. Необходимо вычислить суммарную силу ветра, приложенную к площадке в соответствии с нормами.

На первом этапе формируется исходный набор параметров, включающий параметры АМС, автоматически импортируемые из Excel-модуля для автоматизированного сбора статической составляющей ветровой нагрузки на решетчатую башню [13]: ветровой район, тип местности, форма контура поперечного сечения башни, тип покрытия, и параметры площадок, задаваемые пользователем (коэффициент неучтенных площадей, количество и геометрические параметры площадок и элементов, входящих в каждую площадку).

Алгоритм расчета опирается на методику, изложенную в СП 20.13330.2016. Нормативное значение основной ветровой нагрузки w_0 определяется как сумма средней и пульсационной составляющих. Средняя (статическая) составляющая рассчитывается по формуле:

$$w_m = w_0 k(z_c) c,$$

где w_0 — нормативное значение ветрового давления для данного региона (ветрового района); $k(z_c)$ — ко-

эффициент, учитывающий изменение давления по высоте z_c над землёй; c — аэродинамический коэффициент, зависящий от формы и ориентации поверхности.

Ключевым отличием предлагаемого алгоритма от упрощённого суммирования площадей является детальный учёт аэродинамических характеристик отдельных частей площадки. Каждый элемент ограждения рассматривается как отдельный аэродинамический объект. Площадка моделируется совокупностью элементарных поверхностей, для каждой из которых задаётся свой аэродинамический коэффициент c_{xi} в зависимости от формы поперечного сечения. Для стержневых элементов круглого поперечного сечения он определяется в соответствии с алгоритмом, описанным в [14]. Для вертикального ограждения принимается коэффициент как для пространственной решётчатой конструкции.

Последовательно вычисляются:

- площадь проекции каждого элемента $A_i = b_i \cdot l_i$, где b_i — габарит (диаметр или ширина профиля), l_i — длина элемента;
- аэродинамический коэффициент каждого элемента c_{xi} ;
- суммарная площадь всех элементов ΣA_i ;
- «аэродинамически взвешенная» площадь $\Sigma c_{xi} A_i$;
- площадь проекции контура площадки на перпендикулярную ветру плоскость A_k .

На основе определённых площадей Microsoft Excel рассчитывает:

- коэффициент заполнения контура решётчатой конструкции $\phi = (\Sigma A_i) / A_k$;
- коэффициент η , учитывающий влияние проницаемости пространственной решётчатой поверхности;
- коэффициент k_1 , зависящий от геометрии поперечного контура;



Рис. 2. Объект исследования
Fig. 2. Research subject

— аэродинамический коэффициент $c_x = (1/A_k) \times \sum c_{x_i} A_i$.

Итоговый аэродинамический коэффициент площади определяется выражением:

$$c = c_x(1 + \eta)k_1.$$

Использование этих зависимостей позволяет корректно учитывать частичную проницаемость ограждения и нелинейное влияние плотности заполнения на аэродинамическое сопротивление конструкции.

Расчётное значение ветрового воздействия определяется умножением нормативной величины на коэффициент надёжности по нагрузке γ_f :

$$w = w_m \gamma_f.$$

Разработанный алгоритм формирует статическую составляющую ветрового давления, поскольку именно она является исходной величиной для современных ПК. Пульсационная составляющая в инженерной практике рассчитывается средствами ПК автоматически на основе статической части. При завершении работы модуля формируется расчётная горизонтальная нагрузка на рабочую площадку. Блок-схема алгоритма автоматизированного сбора статической составляющей ветровой нагрузки на рабочие площадки показана на рис. 1.

Алгоритм реализован полностью в табличной форме, с использованием функций Microsoft Excel: ИНДЕКС, ПОИСКПОЗ — выбор табличных значений; ВПР — подбор аэродинамических коэффициентов и нормативных параметров; ПРОИЗВЕД, СУММ, СУММЕСЛИ — агрегирование по элемен-

там; линейная интерполяция (через ПРЕДСКАЗ) — нахождение $k(z_e)$.

Такая организация обеспечивает:

- мгновенное автоматическое обновление результатов при изменении входных данных;
- исключение ошибок ручного моделирования;
- возможность масштабирования алгоритма на площадку разной конфигурации;
- воспроизводимость расчётов;
- интеграцию в цифровые процессы ЖЦИ АМС.

Результаты и обсуждение

Для оценки практической применимости разработанного алгоритма была проведена его апробация на металлической башне сотовой связи высотой 70 м, расположенной в Калужской области (рис. 2). Башня представляет собой пространственную конструкцию в виде вертикального стержня, заземленного в основании. Конструкция опирается на фундаменты под каждой опорой. Внешняя форма башни до отм. +60,000 м — четырехгранная усеченная пирамида; с отм. +60,000 м и выше — четырехгранная призма. В основании башня имеет базу 7,515 м и на отм. +62,774 м — 1,096 м. Все несущие элементы (поояса, раскосы, распорки и диафрагмы) выполнены из прокатных уголков. Конструкция состоит из шести пирамидальных секций высотой 10,00 м и одной призматической секции высотой 9,82 м. Смежные секции соединены между собой накладками на болтах. Секции состоят из отдельных элементов с креплением на болтах. Внутри башни проходит лестница с корзиной ограждения, совмещенная с кабельростом, и площадками для отдыха в каждой секции на отм. +10,000 м, +20,000 м, +30,000 м,

Таблица 1. Ветровая нагрузка на рабочие площадки на отм. +60,000 м, +64,000 м и +70,000 м
Table 1. Wind load on working platforms located at elevations of +60.000 m, +64.000 m and +70.000 m

№	h_c , м	$k(z_c)$	Элемент	b , м	l , м	Кол-во	A_i , м ²	ΣA_i , м ²	A_k , м ²	φ	c_x/c	η	w_m , кгс/м ²	$F/1,2F$, кгс
1	60	1,70	Поручень	0,05	4,00	3	0,20	0,60	4,80	0,27	0,36/0,60	0,698	33,65	161,52/193,82
			Стойка	0,05	1,20	5	0,06	0,30						
			Балка	0,08	4,00	1	0,32	0,32						
2а	64	1,72	Поручень	0,05	4,00	3	0,20	0,60	4,80	0,27	0,36/0,60	0,698	34,05	163,42/196,10
			Стойка	0,05	1,20	5	0,06	0,30						
			Балка	0,08	4,00	1	0,32	0,32						
2б	64	1,72	Поручень	0,05	1,50	3	0,08	0,23	2,25	0,22	0,29/0,51	0,778	28,99	65,22/78,26
			Стойка	0,05	1,20	2	0,06	0,12						
			Балка	0,08	1,50	1	0,12	0,12						
3	70	1,78	Поручень	0,05	2,70	4	0,14	0,54	3,24	0,43	0,58/0,82	0,432	48,06	155,72/186,86
			Стойка	0,12	1,20	4	0,14	0,58						
			Балка	0,08	2,70	1	0,22	0,22						

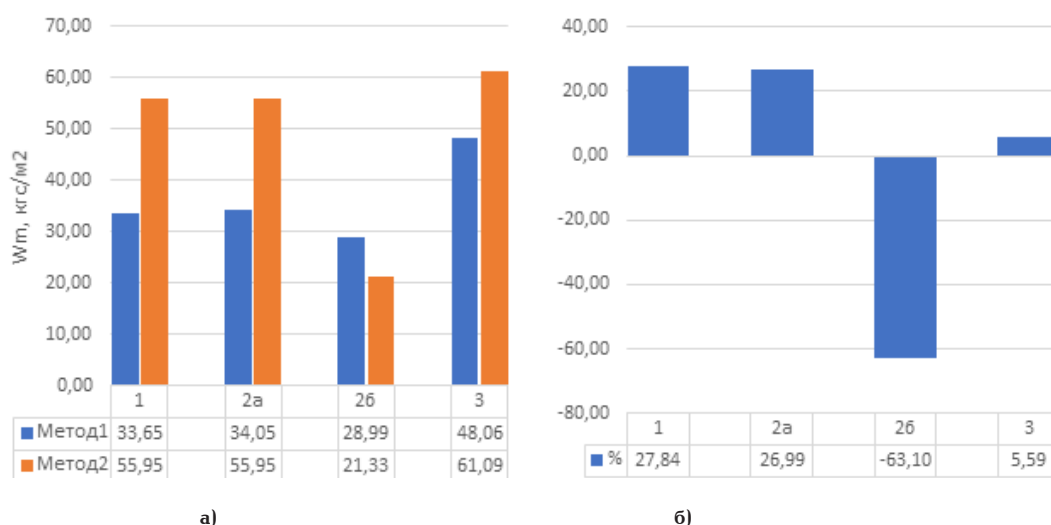


Рис. 3. Сравнение значений ветровой нагрузки, полученных поэлементным и упрощённым методами:
а) статическая составляющая; б) процентное отклонение статической составляющей упрощённого метода
относительно поэлементного

Fig. 3. Comparison of wind load values computed by the elementwise algorithm and the simplified method:
а) static component; б) percentage deviation of the simplified method relative
to the elementwise algorithm

+40,000 м, +50,000 м, +60,000 м, +64,000 м, +70,000 м.

Для трёх верхних рабочих площадок, расположенных на отметках +60,000 м, +64,000 м и +70,000 м, где ветровое воздействие достигает максимальных значений, выполнено определение нормативной ветровой нагрузки двумя независимыми методами.

— Метод № 1 — разработанный поэлементный алгоритм. Итоговые значения нагрузки представлены в табл. 1. Формат выходной таблицы специально разработан в соответствии с требованиями отчётной документации по расчёту несущей способности АМС и используется при формировании расчётных приложений, передаваемых в экспертные и проектные организации.

— Метод № 2 — упрощённая методика, основанная на приведении элементов площадки к эквивалентной сплошной площади, широко применяемая в инженерной практике вследствие простоты реализации и минимальных трудозатрат. В рамках данного подхода суммарная проекция

всех элементов площадки на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, рассматривается как сплошная поверхность, на которую прикладывается нормативное ветровое давление, определяемое по СП 20.13330.2016. Аэродинамический коэффициент принимается единым для всей площадки и не дифференцируется по отдельным элементам ограждения. При этом не учитываются индивидуальные аэродинамические характеристики элементов, проницаемость решётчатой конструкции, коэффициент заполнения и эффект перераспределения потока воздуха между элементами.

Сопоставление результатов для трёх верхних рабочих площадок, рассчитанных двумя методами, представлено на рис. 3. Полученные данные позволяют количественно оценить влияние проницаемости и поэлементного подхода на итоговую величину ветровой нагрузки и выявить случаи, когда применение упрощённого метода приводит к существенному завышению или недооценке нагрузок.

Для площадок № 1, № 2а и № 3 упрощённый метод показал рост нагрузки на 5–28 %, что объясня-

ется отсутствием учёта проницаемости ограждения, использованием одного усреднённого аэродинамического коэффициента с вместо индивидуальных, игнорированием коэффициентов ϕ и η . Такое завышение приводит к необоснованному увеличению сечений элементов крепления площадок, нагрузок на башню в узлах опирания площадки, затрат на металлоёмкость.

Площадка № 26 представляет собой конструкцию с меньшей суммарной площадью элементов, но и с меньшей площадью контура. Упрощённый метод не различил реального изменения геометрии и привёл к критическому недоучёту нагрузки на 63 %. Это особенно опасно, поскольку нагрузка оказывается меньше фактической, узлы крепления и элементы поясов могут испытывать недопустимое напряжённое состояние, а вероятность отказа возрастает.

На основании проведённого анализа можно выделить две устойчивые зависимости:

- чем выше расположена площадка, тем выше ошибка упрощённого метода из-за роста $k(z_g)$;

- чем неоднороднее геометрия ограждения, тем более значимо различие методов (алгоритм чувствителен к A_k , c_{xi} , ϕ , η , а упрощённый метод — нет).

Полученные результаты подтверждают, что упрощённый метод не обеспечивает необходимой точности для реальных АМС. Позлементный алгоритм является более надёжным и универсальным: он корректно реагирует на изменение конфигурации площадки и обеспечивает реалистичную оценку ветровой нагрузки. Включение алгоритма в модуль расчёта АМС позволяет повысить точность оценки нагрузок, уменьшить металлоёмкость там, где это безопасно и обнаружить опасные случаи недоучёта, исключённые в упрощённой методике. Таким образом, апробация доказала необходимость перехода в инженерной практике АМС от упрощённых схем к позлементным автоматизированным алгоритмам, подобным разработанному.

Другим важным преимуществом является автоматизация и удобство расчёта. Использование Microsoft Excel позволило превратить расчёт ветровой нагрузки в быстро выполняемую процедуру. После первоначальной настройки таблицы с формулами любой инженер может оперативно получить результат, изменяя ключевые параметры. Это особенно актуально в рамках концепции цифровой поддержки ЖЦИ: на разных стадиях жизненного цикла АМС требуется повторная оценка нагрузок (например, при установке новых антенн, проверке сооружения при реконструкции или в ходе эксплуатации). Наличие готового цифрового инструмента значительно ускоряет такие оценки и уменьшает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором при ручных расчётах. Исходные параметры АМС автоматически импортируются из разработанного ранее Excel-модуля статического сбора ветровой нагрузки на решётчатые башни [13]. Такой подход обеспечивает единообразие расчётов и их интеграцию в общий цифровой процесс анализа несущей способности АМС.

С точки зрения интеграции в инженерную практику, разработанный алгоритм хорошо вписывается в существующие рабочие процессы. Microsoft Excel широко используется в проектных организациях, и специалистам не требуется осваивать специализированное программное обеспечение для проведения данного расчёта — достаточно воспользоваться шаблоном таблицы. Более того, результаты, получен-

ные в Microsoft Excel, могут быть напрямую включены в отчётную документацию или перенесены в систему автоматизированного проектирования. Тем самым обеспечивается сквозная цифровая цепочка: от вычисления нагрузок до оценки прочности — всё с минимальным ручным вмешательством.

Разработанный модуль расчёта ветровых нагрузок на рабочие площадки уже интегрирован в функционирующую систему автоматизированного анализа несущей способности АМС, сформированную автором в предыдущих работах [15]. Указанная система объединяет несколько специализированных программных компонентов: модуль сбора статической составляющей ветровой нагрузки на элементы АМС, модуль расчёта нагрузок от антенно-фидерного оборудования, подсистему вычисления аэродинамических коэффициентов и расширяемую базу данных оборудования. Новый модуль органично дополняет существующую архитектуру, закрывая ранее отсутствующее звено — автоматизированный расчёт ветровой нагрузки на рабочие и технологические площадки. Формирование единой среды расчёта нагрузок позволяет обеспечивать: полную трассировку исходных данных, исключение ручного ввода, взаимосвязанность всех типов нагрузок, автоматическую генерацию отчётных таблиц и стандартизацию структуры входных данных для последующих расчётов в отечественных ПК.

В настоящее время ведётся разработка комплексной программы для расчёта ветровых и весовых нагрузок, интегрируемой с базой данных сортиментов металлопроката и совместимой с существующей подсистемой импорта — экспорта данных расчётной модели. На следующем этапе планируется расширение комплекса до полноценной системы цифровой поддержки жизненного цикла АМС, включающей:

- автоматизированное построение расчётных схем;
- генерацию нагрузочных сценариев с учётом фактического оснащения объекта;
- встроенную экспертизу несущей способности элементов;
- модуль формирования технической документации;
- базу цифровых прототипов эксплуатируемых АМС.

Таким образом, разработанный модуль является не только самостоятельным инструментом, но и элементом формирующейся отечественной платформы инженерных расчётов АМС, обеспечивающей сквозную цифровую поддержку процессов проектирования, обследования и эксплуатации.

Заключение

Разработан и формализован позлементный алгоритм определения нормативной ветровой нагрузки на рабочие площадки АМС, учитывающий индивидуальные геометрические и аэродинамические характеристики элементов ограждения, а также коэффициент заполнения и проницаемость решётчатой структуры. Алгоритм реализован в среде электронных таблиц Microsoft Excel, что обеспечивает автоматизацию вычислений, воспроизводимость результатов и возможность интеграции в цифровой контур инженерного анализа.

Апробация алгоритма на реальной башне высотой 70 м показала, что по сравнению с упрощённой методикой позлементный подход обеспечивает существенно более корректное определение ветро-

вой нагрузки. Для трёх верхних площадок выявлено завышение нагрузки по упрощённому методу на 5–28 %, а в одном из случаев — критическое недоучётное расхождение до –63 %, обусловленное игнорированием геометрии и структуры ограждения. Полученные результаты подтверждают, что упрощённые методы обладают ограниченной применимостью и могут приводить как к неоправданному увеличению металлоёмкости конструкций, так и к опасному снижению требуемой прочности узлов опирания. Использование разработанного алгоритма снижает неопределённость расчётов, повышает достоверность оценки ветровых воздействий и обеспечивает стандартизацию отчётных форм в рамках расчёта несущей способности АМС.

Представленный модуль органично дополняет ранее созданные автором программные компоненты систем автоматизации расчётов АМС и формирует недостающее звено — автоматизированный расчёт ветровых нагрузок на рабочие и технологические площадки. В совокупности эти инструменты создают основу для формирования комплексной отечественной системы цифровой поддержки жизненного цикла АМС, включающей сбор данных, расчётные модули, экспертизу и автоматизированную генерацию отчётной документации.

Дальнейшее развитие исследования связано с расширением алгоритма, интеграцией с программными комплексами, автоматическим формированием расчётных схем, а также созданием единой цифровой платформы расчёта и сопровождения АМС.

Список источников / References

1. Кононов Д. А., Карлова Е. В., Беляева З. В. Некоторые проблемы определения ветровой нагрузки на решетчатые пространственные конструкции // Russian Journal of Construction Science and Technology. 2023. Т. 9, № 2. 0902002. <https://doi.org/10.15826/rjct.2023.2.002>. EDN: GNVXLI.

Kononov D. A., Karlova E. V., Belyaeva Z. V. Some problems of determining the wind load on lattice spatial structures. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2023;9(2): 0902002. <https://doi.org/10.15826/rjct.2023.2.002>. EDN: GNVXLI. (In Russ.).

2. Габова В. В., Родионов А. В., Сиротенко О. О. Исследование поведения конструкций высотных зданий при воздействии ветровых нагрузок // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 5 (93). С. 5–17. EDN: ZMTJXN.

Gabova V. V., Rodionov A. V., Sirotenko O. O. Investigation of the behavior of structures of high-rise buildings under the influence of wind loads. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2023;5(93):5–17. EDN: ZMTJXN. (In Russ.).

3. Голиков А. В., Веремеев Д. В. Обобщенные принципы компоновки и назначения габаритных размеров трехгранных решетчатых башен // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1 (90). С. 14–32. EDN: KHISBG.

Golikov A. V., Veremeev D. V. Generalized principles of layout and dimensioning of trihedral lattice towers. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2023;1(90):14–32. EDN: KHISBG. (In Russ.).

4. Pavan Kumar M., Markankeya Raju P., Tirupathi Naiku G. Effect of wind speed on structural behaviour of Monopole and self-support telecommunication towers. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2017;18(6):911–927.

5. Axisa R., Muscat M., Sant T., Farrugia R. N. Structural assessment of a lattice tower for a small Multi-Bladed Wind Turbine. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2017;8(4):343–358. <https://doi.org/10.1007/s40095-017-0239-3>.

6. Голиков А. В., Михальченко Е. А., Мельникова Ю. А. Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4. С. 53. EDN: GKJOAC.

Golikov A. V., Mikhachonok E. A., Melnikova Yu. A. Analysis of the effect of the lattice type on the distribution of forces in the tower. *Inzhenernyi Vestnik Dona*. 2019;4:53. EDN: GKJOAC. (In Russ.).

7. Иоскевич А. В., Савченко А. В., Егорова Е. С., Иоскевич В. В. Понижающий коэффициент ветрового давления и его учет при расчете решетчатых конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4(31). С. 45–57. EDN: UISIAF.

Ioskevich A. V., Savchenko A. V., Egorova E. S., Ioskevich V. V. The impact of the reduction factor of wind force coefficient to lattice structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;4(31):45–57. EDN: UISIAF. (In Russ.).

8. Сатанов А. А., Поздеев М. Л., Симонов А. В. [и др.]. Экспериментальное исследование распределения аэродинамических коэффициентов на высотное здание // Приволжский научный журнал. 2022. № 3. С. 43–51. EDN: RSVTLK.

Satanov A. A., Pozdeev M. L., Simonov A. V. [et al.]. Experimental research of the distribution of aerodynamic coefficients on a high-rise building. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2022;3:43–51. EDN: RSVTLK. (In Russ.).

9. Tah A. M., Alsilevanai K. M., Özakça M. Comparison of various bracing system for self-supporting steel lattice structure towers. *American Journal of Civil Engineering*. 2017;5(2):60–68. <https://doi.org/10.11648/j.ajce.20170502.11>.

10. Mahesh N., Ranga Rao V. Design and estimation of electrical steel towers. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017;8(1):646–652.

11. Qi Q., Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*. 2018;6:3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>.

12. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital twin in industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019;15(4):2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.

13. Маркина Ю. Д. Автоматизация сбора статической составляющей ветровой нагрузки на решетчатую башню // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2025. Т. 22, № 9. С. 23–30. <https://doi.org/10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030>. EDN: UQDTZQ.

Markina Yu. D. Automated collection of the static component of wind load on lattice towers. *Herald Of Computer And Information Technologies*. 2025;22(9):23–30. <https://doi.org/10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030>. EDN: UQDTZQ. (In Russ.).

14. Маркин А. А., Маркина Ю. Д. Модуль расчёта аэродинамического коэффициента как элемент цифрового контура инженерного анализа антенно-мачтовых сооружений // Русский инженер. 2026. №1 (90). С. 87–92. EDN: ELENER.

Markin A. A., Markina Yu. D. Aerodynamic coefficient calculation module as an element of the digital framework for engineering analysis of antenna-mast structures. *Russian Engineer*. 2026;1(90):87–92. EDN: ELENER. (In Russ.).

15. Маркина Ю. Д. Автоматизация расчета несущей способности антенно-мачтовых сооружений // ГрафиКон 2025: сборник трудов 35-й Международной конференции. Йошкар-Ола, 2025. С. 715–723. <https://doi.org/10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-715-723>. EDN: YYREHE.

Markina Yu. D. Automation of load-bearing capacity calculation for antenna mast structures. *GraphiCon 2025: Proceedings of the 35th International Conference*. Yoshkar-Ola,

Информация об авторе:

МАРКИНА Юлия Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория сооружений и технической механики» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 4203-4240

AuthorID (РИНЦ): 1229730

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7167-0652>

e-mail: poluektoff@bk.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 04.12.2025; одобрена после рецензирования 28.01.2026; принята к публикации 18.05.2026.

Information about the author:

MARKINA Yuliya Dmitriyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Theory of Structures and Technical Mechanics Department, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod.

SPIN-code: 4203-4240

AuthorID (RSCI): 1229730

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7167-0652>

e-mail: poluektoff@bk.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The article was submitted 04.12.2025; approved after reviewing 28.01.2026; accepted for publication 18.05.2026.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И МОРФОЛОГИИ ЧАСТИЦ ШЛАМА В КОНТЕКСТЕ ОБРАЗОВАНИЯ МОСТИКОВ СВАРКИ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ

Ю. О. Бредгауэр✉, А. А. Федоров, Д. А. Полонянкин

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

✉ jobredgauer@omgtu.ru

В статье представлены результаты исследования частиц шлама, включая их элементный состав, а также анализ потенциального влияния шлама на образование мостика сварки, что может приводить к короткому замыканию и обрыву проволоки при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке штамповой стали 5ХНМ на станке Sodick VZ 300L.

Для определения размеров, морфологии, формы и элементного состава частиц шлама использованы методы растровой электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и лазерного дифракционного анализа. Установлено, что средние значения размеров частиц шлама составили $25,04 \pm 5,26$ мкм для образцов, собранных со стола, и $20,97 \pm 15,10$ мкм — для частиц со дна ванны. Доля эффективных частиц, имеющих критический размер (более 25 мкм) и способствующих образованию мостика сварки, достигает 35 % (для частиц со стола) и 45 % (для частиц со дна ванны). Элементный анализ выявил, что частица состоит из цинка и меди, что соответствует элементному составу материала электрода-инструмента — латуни.

Полученные результаты позволяют лучше понять механизм возникновения дефектов и предложить меры для оптимизации технологического процесса.

Ключевые слова: проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, частицы шлама, мостик сварки, короткое замыкание, растровая электронная микроскопия, лазерный дифракционный анализ, элементный состав

Для цитирования: Бредгауэр Ю. О., Федоров А. А., Полонянкин Д. А. Исследование гранулометрического состава и морфологии частиц шлама в контексте образования мостиков сварки при электроэрозионной обработке штамповой стали. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 40–48. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-40-48>. EDN: RWWOHA.



© Бредгауэр Ю. О., Федоров А. А., Полонянкин Д. А., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

INVESTIGATION OF GRANULOMETRIC COMPOSITION AND MORPHOLOGY OF DEBRIS PARTICLES IN THE CONTEXT OF WELDING BRIDGE FORMATION AT ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF THE STAMPED STEEL

Iu. O. Bredgauer✉, A. A. Fedorov, D. A. Polonyankin

Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

✉ jobredgauer@omgtu.ru

This article presents the results of a study of debris particles, including their elemental composition, and an analysis of the potential impact of debris particles on welding bridge formation, which can lead to short circuits and wire breakage during of welding bridge formation at electrical discharge machining of the 5NiCrMo stamp steel on a Sodick VZ 300L machine.

The authors use the scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy and the laser diffraction analysis to determine the size, morphology, shape and elemental composition of debris particles. Moreover, the authors have established that the average debris particles sizes are

25.04 ± 5.26 microns for samples from the tabletop and 20.97 ± 15.10 microns for samples from the bottom of the tub. The proportion of effective particles with a critical size (greater than 25 microns) that contribute to welding bridge formation reaches 35 % (for particles from the tabletop) and 45 % (for particles from the bottom of the tub). An elemental analysis reveals that the particle consists of zinc and copper, corresponding to the elemental composition of the electrode-tool — brass material.

Therefore, the results provide a better understanding of the defect formation mechanism and suggest measures to optimise the process.

Keywords: wire electrical discharge machining, debris particles, welding bridge, short circuit, scanning electron microscopy, laser diffraction analysis, elemental composition

For citation: Bredgauer Iu. O., Fedorov A. A., Polonyankin D. A. Investigation of granulometric composition and morphology of debris particles in the context of welding bridge formation at electrical discharge machining of the stamped steel. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):40–48. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-40-48>. EDN: RWWOHA. (In Russ.).



© Bredgauer Iu. O., Fedorov A. A., Polonyankin D. A., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПВЭЭО) повсеместно используется при изготовлении штамповой оснастки и пресс-форм для лопаток авиационных газовых турбин, так как имеет ряд преимуществ перед традиционными методами: обработка любых токопроводящих материалов вне зависимости от их физико-механических характеристик, возможность получения узких прорезей и щелей, отсутствие силы резания и, как следствие, деформации тонкостенных деталей. Однако низкая производительность метода до сих пор является серьезным ограничением, на что в большей степени влияет такое явление, как обрыв проволоки во время обработки, поэтому исследование причин в настоящее время является актуальной задачей.

Учеными выдвинут ряд гипотез о том, что является истинной причиной обрыва проволоки во время ПВЭЭО [1–6]. Одной из причин является короткое замыкание, происходящее из-за наличия проводимых частиц в межэлектродном промежутке [3, 6]. В научной литературе широко используется термин «мостик сварки» [3, 6, 7–11]. Под этим понятием подразумевается скопление проводящих частиц в зоне обработки. Эти частицы могут включать как материал заготовки, так и материал электрода-инструмента, находящийся в рабочем промежутке, поскольку система промывки не всегда обеспечивает полное удаление шлама [12–14]. Важно отметить, что такие частицы образуются при каждом разряде и в значительном количестве присутствуют в межэлектродном зазоре. Об этом также утверждает ряд источников, полагающих, что короткое замыкание, а вследствие и обрыв проволоки происходили значительно чаще при загрязненной рабочей жидкости [3, 14].

Цель исследования

По нашему мнению, мостик сварки образуется из частиц шлама. Однако с целью повышения ясности механизма формирования такого мостика необходимо детально исследовать частицы шлама, так как их морфология и размеры могут значительно влиять на него, вызывая короткое замыкание, обуславливающее обрыв проволоки. Таким образом, цель работы — исследовать частицы шлама, включая их элементный состав, а также проанализировать потенциальное влияние шлама на образование мостика сварки.

Существуют работы по исследованию размеров и морфологии частиц [8, 10, 11], но ни одна из них не описывает механизм образования мостика сварки. Также отсутствует информация о какой-либо классификации частиц шлама.

Методология

В качестве образца использовался параллелепипед из стали 5ХНМ с габаритными размерами 50×50×150 (Д×Ш×В) мм. Электродом-инструментом являлась мягкая латунная проволока, содержащая 65 % Cu и 35 % Zn, диаметром 250 мкм. Эксперименты произведены на проволочном электроэрозионном станке Sodick VZ 300L (Япония), который использует дистиллированную воду в качестве рабочей жидкости. Во время проведения эксперимента положение сопел соответствовало закрытой обработке (рис. 1).

Текущие значения электрических параметров (тока и напряжения), которые были автоматически рассчитаны программным обеспечением станка, во время экспериментов не изменялось вручную и фиксировалось при помощи встроенных вольтметра и амперметра. Сила тока имела среднее значение в 10,5 А (диапазон от 10,4 до 10,6 А), а среднее значение напряжения составило 40 В (диапазон от 38 до 42 В).

По указанным режимам производился рез заготовки в одном направлении с целью образования частиц шлама. Во время обработки были зарегистрированы 4 обрыва проволоки, 2 из них —

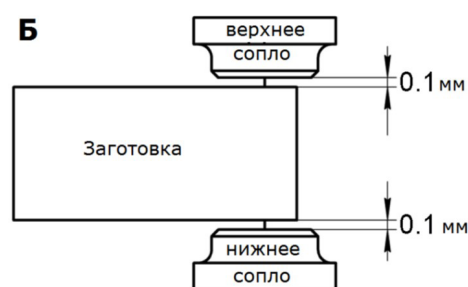


Рис. 1. Схема положения сопел: режим закрытой обработки (верхнее и нижнее сопла расположены на расстоянии 0,1 мм от детали)
Fig. 1. Scheme of the nozzle disposition in the "CLOSE" mode (upper and lower nozzles are located at a distance of 0.1 mm from the part)

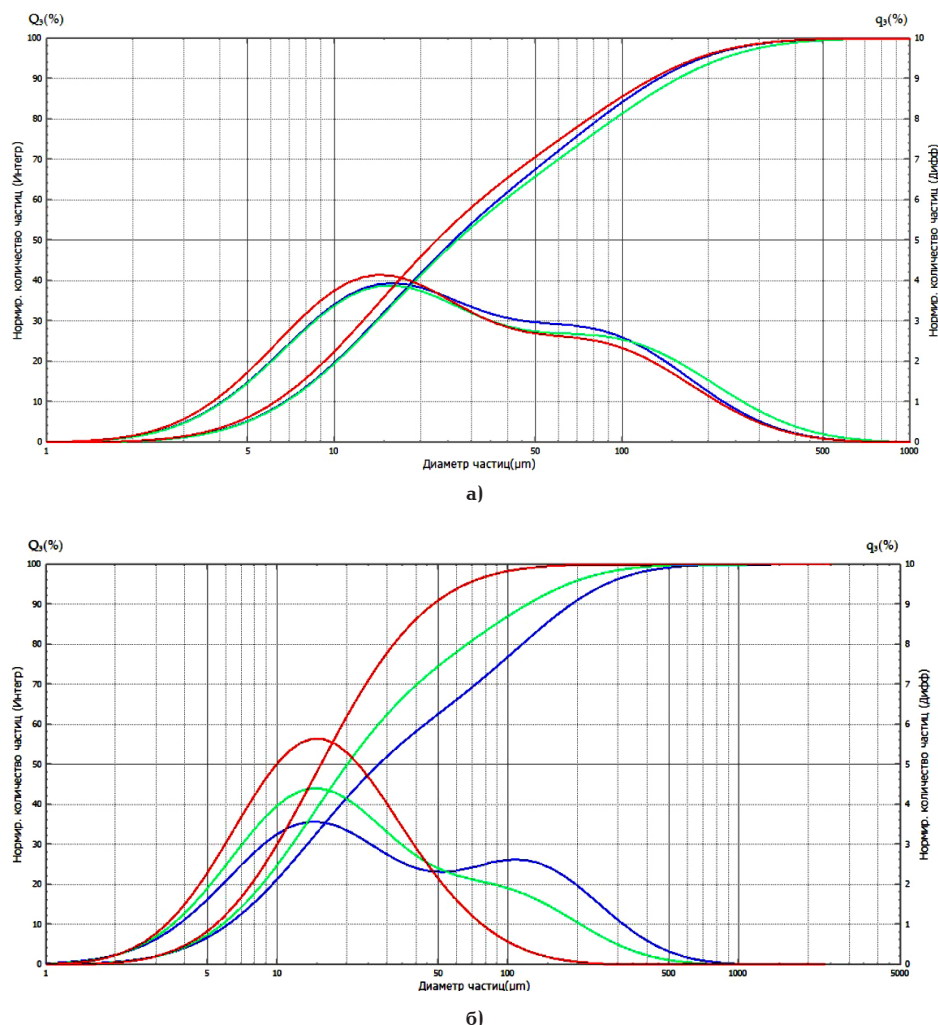


Рис. 2. Диаграммы дифференциального и интегрального распределения частиц шлама:
а) со стола; б) со дна ванны
Fig. 2. Diagrams of differential and integral distributions of debris particles:
a) from the tabletop; б) from the bottom of the tub

в начале реза. После обработки заготовки ванная с диэлектрической жидкостью была естественным образом (без обдува, подогрева и т. д.) высушена. Частицы шлама были собраны с поверхности рабочего стола и со дна ванны для исследования.

Собранный шлам был исследован на растровом электронном микроскопе JEOL JCM-5700 с энергодисперсионным спектрометром JED-2300. Большинство наблюдений было проведено с помощью сигнала SEI (вторичные электроны). Параметр размера пятна — 50, ускоряющее напряжение равнялось 15 кВ. Из-за разномасштабности исследований требовалось различное увеличение, которое лежало в диапазоне от $\times 1000$ до $\times 5000$. Двусторонняя токопроводящая клейкая лента была размещена на дне держателя образцов для растровой электронной микроскопии. Избыточное количество шлама, прикрепленного к ленте, удалялось потоком сжатого воздуха.

Интегральное и дифференциальное распределения размеров шлама получали методом лазерного дифракционного анализа на приборе Shimadzu SALD-2300, оснащённом лазером с длиной волны 680 нм, обеспечивающим измерения в диапазоне от 17 нм до 2500 мкм. Для более точного исследования было проведено по три измерения каждого объема шлама, собранного отдельно со стола и с ванны. Итого 6 измерений.

Результаты и обсуждение

Предполагается, что скопление частиц шлама между электродами обуславливает образование мостика сварки. Однако не все частицы способны быть «строительным материалом» для него, поэтому необходимо классифицировать их по степени влияния на формирование мостика сварки. Результаты исследования помогут понять механизм образования мостика сварки. С этой целью проведено исследование распределения частиц шлама по размерам, форме и морфологии поверхности. Установлена вероятность формирования агломератов и образования мостика сварки из них.

1. Размеры частиц шлама

Размер частиц шлама является важным параметром при обсуждении механизма формирования мостика сварки, поскольку величина межэлектродного зазора в большинстве современных станков составляет 50 мкм, и необходимо понимать, из какого количества частиц формируется мостик сварки — одна частица размером 50 мкм, две частицы по 25 мкм, три частицы по 17 мкм и т. д.

С помощью лазерного дифракционного анализа (ЛДА) были проанализированы размеры частиц шлама, собранных со стола и со дна ванны электроэрозионного оборудования после обработки заготовки. По результатам анализов были получены диаграммы дифференциального и интегрального

Таблица 1. Распределение размеров частиц шлама
Table 1. Size distribution of debris particles

Размеры частиц мусора	Распределение размеров, %							
	Забор со стола				Забор со дна ванны			
	1	2	3	Среднее значение	1	2	3	Среднее значение
От 0,1 до 10 мкм	16	17	20	18	12	13	15	13
От 10 до 25 мкм	36	47	58	47	40	45	42	42
От 25 до 50 мкм	11	12	17	13	14	13	12	13
От 50 до 250 мкм	37	24	5	22	34	29	31	32

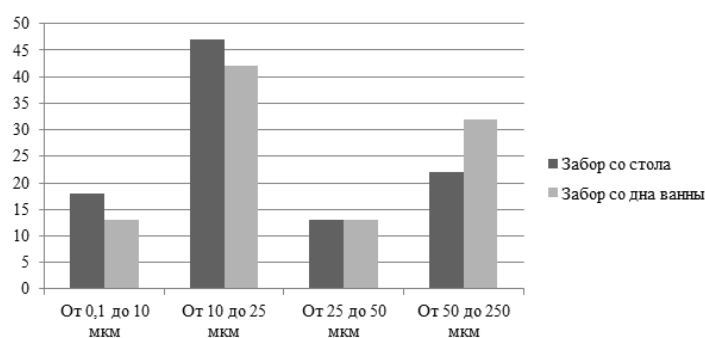


Рис. 3. Диаграмма распределения размеров частиц шлама по среднему значению (в процентном соотношении)
Fig. 3. Particle size distribution diagram for debris by average value (percentage)

распределения частиц шлама, которые представлены на рис. 2. Результаты анализа показали бимодальный характер распределения частиц. Основная масса частиц обладает размерами от 10 до 25 мкм.

Средние значения размеров составили $25,04 \pm 5,26$ мкм для частиц шлама, собранного со стола, и $20,97 \pm 15,10$ мкм — для частиц шлама со дна ванны. Широкий диапазон допустимых отклонений, особенно для частиц, собранных со дна ванны, объясняется образованием агломератов. Размеры частиц, определенные методом ЛДА, находятся в диапазоне от 0,1 до 250 мкм. Для наглядности результаты анализа занесены в табл. 1, на основании таблицы составлена диаграмма (рис. 3).

Рис. 2, 3 и табл. 1 позволяют увидеть, что основная часть шлама имеет размер от 0,1 до 250 мкм. Важно отметить, что в шламе также встречаются частицы с размерами более 25 мкм. Это является важным, поскольку вероятность образования мостика сварки из двух частиц по 25 мкм выше, чем из трех и более частиц.

В собранном со дна ванны шламе больше процентное содержание частиц мусора, обладающих размером от 25 мкм и больше (в среднем 35 и 45 % соответственно). Это можно объяснить тем, что осевший шлак на дне ванны может слеживаться и образовывать агломераты. Также существует предположение, что образование подобных частиц большого размера могло произойти из-за слипания нескольких частиц после обработки заготовки [9]. Вместе с тем наличие таких частиц не свидетельствует о том, что они попадают в межискровый зазор во время обработки. Собранный со стола шлак является сравнительно более мелкодисперсным, чем шлак со дна ванны.

В исследовании [10] были проанализированы размеры частиц шлама, полученных при микро-

сверлении методом электроэрозионной обработки (ЭЭО), и были выявлены следующие результаты: 70–80 % частиц имеют размер 5–15 мкм и 20–30 % частиц — от 15 до 140 мкм. Эти результаты отличаются от тех, что были получены в работе [15]. В работе [15] исследовали шлак, образовавшийся после единичного разряда при различных длинах импульса, и выяснили, что в среднем 60–65 % частиц шлама имеют размер более 30 мкм. Однако такую разницу в результатах можно объяснить различием методов ЭЭО, материала заготовок, используемых для проведения эксперимента, и параметров обработки. Кроме того, в работах [10, 15] не указано место сбора частиц шлама.

Таким образом, в шламе обнаруживаются частицы с различными размерами, в том числе превышающими величину межискрового зазора, которая составляет 50 мкм. Распределение частиц шлама по размерам необходимо для расчета вероятности формирования мостика сварки из частиц определенного размера.

2. Морфология частиц шлама

Частицы, собранные со стола станка, имеют более мелкие размеры, чем частицы, собранные со дна ванны. Это также подтверждают результаты ЛДА. На рис. 4 представлены снимки частиц шлама при тысячекратном увеличении, собранных со стола станка. Можно отметить, что большинство частиц имеют сферическую форму, их размеры не превышают 20 мкм (рис. 4а). В шламе, собранном с рабочего стола, обнаружены мелкие частицы размером около 1 мкм, что удовлетворительно согласуется с результатами исследований [8]. Установлено, что большинство частиц также имеет сферическую гладкую форму.

На рис. 4б большее количество частиц также имеет сферическую форму. Некоторое количество

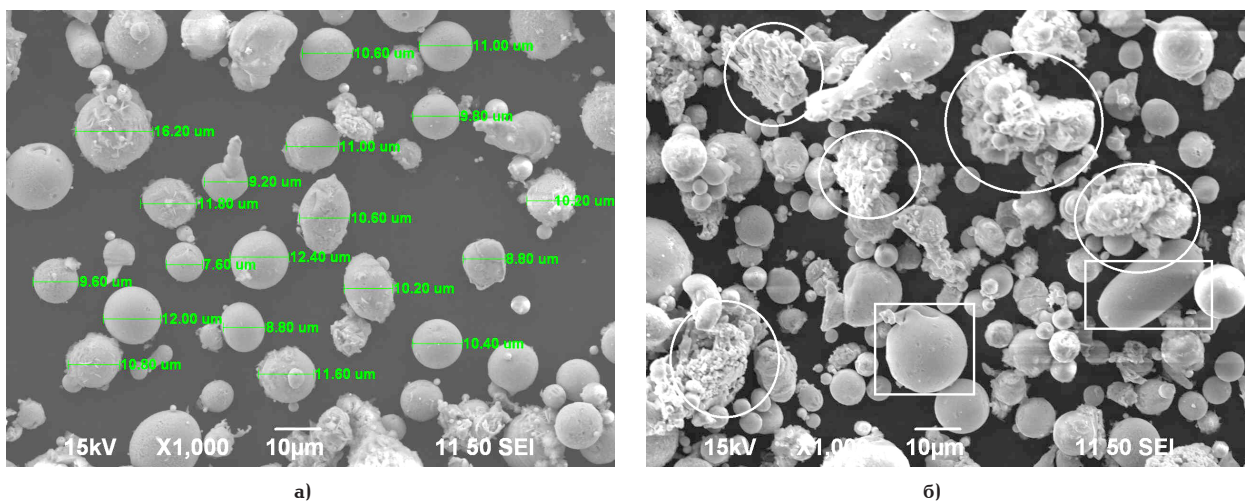


Рис. 4. Микрофотографии частиц шлама, собранных со стола станка:
а) микрофотография частиц с нанесением размеров в мкм; б) морфология частиц различной формы

Fig. 4. Micrographs of sludge particles collected from the machine tabletop:
a) micrograph of particles with dimensions in microns; б) morphology of particles of various shapes

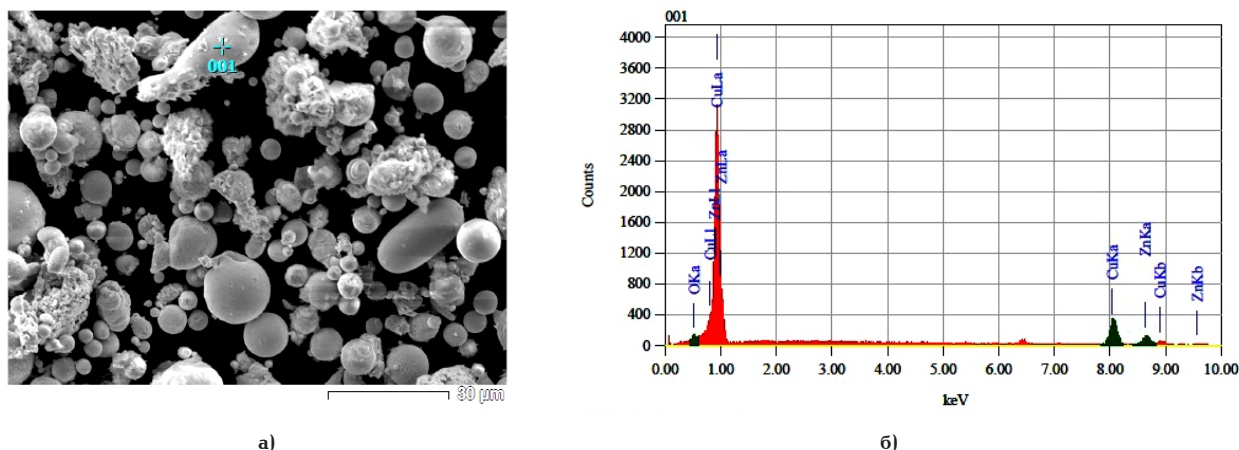


Рис. 5. Анализ элементного состава частицы шлама:
а) микрофотография с указанием места проведения химического анализа;
б) энергодисперсионный спектр химических элементов

Fig. 5. Elemental analysis of a debris particle:
a) micrograph, indicating the location of the chemical analysis;
б) energy-dispersive spectrum of chemical elements

имеет овальную форму (выделены квадратной рамкой). Однако можно наблюдать и агломераты, состоящие из нескольких частиц (выделены окружностью на рис. 4б). Их размеры превышают 20 мкм, а поверхность не является однородной.

Наличие у растрового электронного микроскопа энергодисперсионного спектрометра JED-2300 позволило провести элементный анализ частиц шлама, собранного со стола. Элементный анализ позволит получить более точные данные об электропроводности, теплопроводности и других физических характеристиках, необходимых для дальнейших исследований механизма формирования мостика сварки и расчета выделяемого тепла при коротком замыкании.

На рис. 5а отмечено место (001) проведения анализа, а на рис. 5б представлен энергодисперсионный спектр, где по горизонтальной оси отмечена энергия характеристического рентгеновского излучения, а по вертикальной — число импульсов.

Для большей наглядности процентное содержание химических элементов в массовой и атомной долях представлены в табл. 2. Можно сделать вывод, что частица состоит из цинка и меди, что соот-

ветствует элементному составу материала электрода-инструмента — латуни.

При исследовании частиц шлама со дна ванны методом растровой электронной микроскопии были обнаружены крупные агломераты размерами от 25 до 80 мкм (рис. 6). Наличие таких частиц не свидетельствует о том, что они находились в межискровом зазоре во время обработки. В работе [8] также предположено, что образование подобных частиц несферической формы могло произойти из-за слипания нескольких частиц после обработки заготовки.

Однако на рис. 6б продемонстрирована частица при увеличении в 3000 крат, размеры которой равны 25 мкм. Такая частица не могла образоваться путём слёживания. Вероятнее всего такая частица образовалась при плавлении материала во время обработки, а поэтому находилась в межискровом зазоре. Также при анализе микрофотографий можно заметить, что присутствуют агломераты, как более крупные (рис. 6а, б, в), так и более мелкие (рис. 6г).

Размеры агломератов сложно описать только одним параметром, так как в различных направлениях размеры варьируются. Важно отметить, что поверх-

Таблица 2. Элементный состав частицы шлама со стола (на основе рис. 5)
Table 2. Elemental composition of a debris particle from a tabletop (based on the Fig. 5)

Химические элементы	Энергия характеристического рентгеновского излучения, keV	Массовая доля, %	Атомная доля, %
O	0,525	1,84	6,98
Cu	8,040	66,15	63,26
Zn	8,630	32,01	29,76

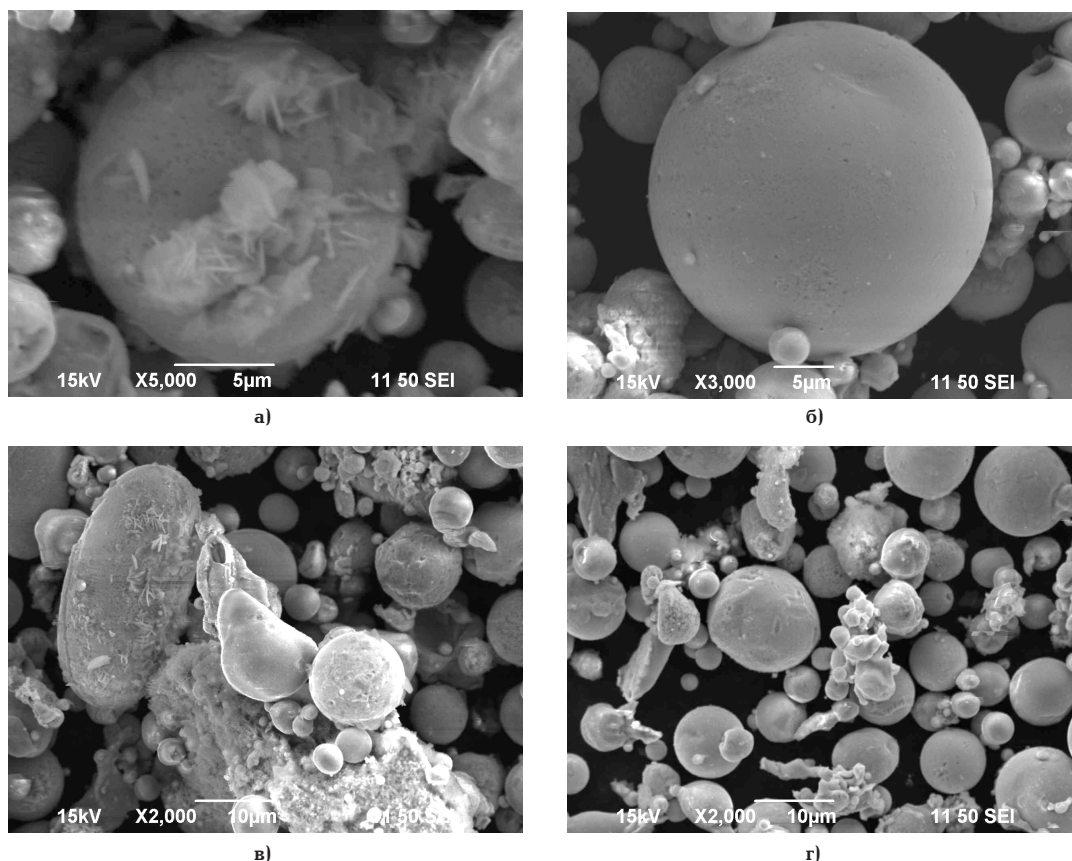


Рис. 6. Микрофотографии частиц шлама, собранных со стола станка:

- а) частица с мартенситными пластинками при увеличении 5000×;
б) «эффективная» частица при увеличении 3000×;
в) конгломерат при увеличении 2000×; г) конгломераты при увеличении 2000×
Fig. 6. Micrographs of debris particles collected from the machine tabletop:
а) particle with martensite platelets at 5000× magnification;
б) "effective" particle at 3000× magnification;
в) conglomerate at 2000× magnification; г) conglomerates at 2000× magnification

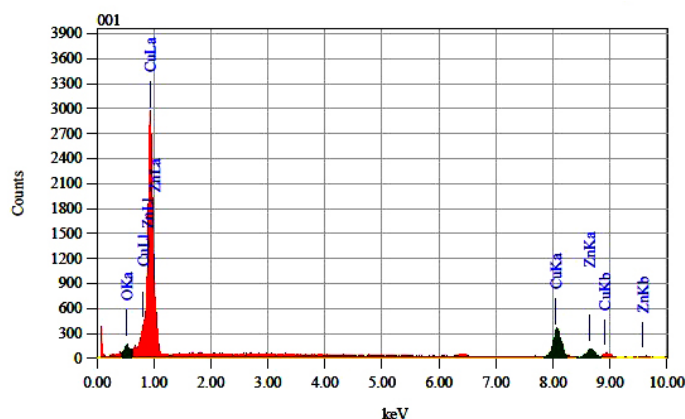
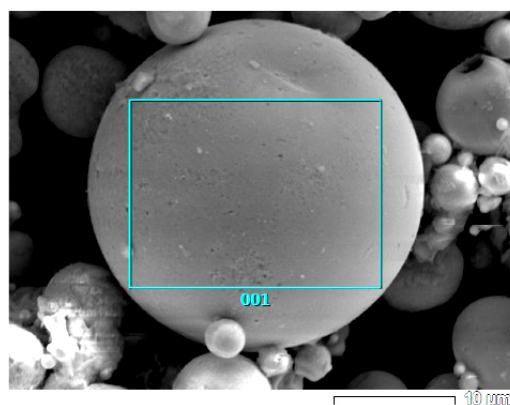


Рис. 7. Анализ элементного состава частицы шлама: а) микрофотография с указанием места проведения химического анализа; б) энергодисперсионный спектр химических элементов
Fig. 7. Elemental analysis of a debris particle: а) micrograph, indicating the location of the chemical analysis;
б) energy-dispersive spectrum of chemical elements

Таблица 3. Элементный состав частицы шлама с ванны (на основе рис. 7)
Table 3. Elemental composition of a debris particle from a tub (based on the Fig. 7)

Химические элементы	Энергия характеристического рентгеновского излучения, keV	Массовая доля, %	Атомная доля, %
O	0,525	2,93	10,79
Cu	8,040	69,33	64,23
Zn	8,630	27,74	24,98

ности агломератов неровные, состоят из большого количества более мелких частиц сферической и несферической форм. На рис. 6а поверхность агломератов имеет мартенситные пластинки в виде тонких игл. В работе [16] поясняется механизм их формирования на поверхности шлама.

Для частиц шлама, собранных со дна ванны, был проведен анализ элементного состава энергодисперсионной спектроскопией.

Результаты представлены на рис. 7 и занесены в табл. 3.

Элементный анализ частицы, отмеченной на рис. 7 и в табл. 2, указывает на то, что состав материала (массовая доля Cu — 69,33 %, Zn — 27,74 %) соответствует материалу электрода-инструмента (Cu — 65 %, Zn — 35 %).

3. Классификация частиц шлама

В соответствии с полученными данными о размерах и морфологии частиц шлама (из п. 1 и 2), их можно разделить на «эффективные» и «неэффективные» частицы. Это означает, что некоторые из них обладают способностью образовывать мостик сварки и, следовательно, могут спровоцировать короткое замыкание, в то время как другие не имеют такой вероятности.

Неэффективные частицы шлама (можно в большом количестве наблюдать на рис. 4а и рис. 6г) имеют сферическую форму, гладкую поверхность, они полностью кристаллизованы, а их размер не превышает половины величины межискрового зазора (размер межискрового зазора — 50 мкм). Такие частицы, по всей вероятности, не могут вызвать короткого замыкания, т. к. они свободно вымываются потоками диэлектрической жидкости с рабочей зоны. Благодаря сферической форме, гладкости поверхности и размерам, даже соударение неэффективных частиц в потоке прокачиваемой жидкости не приведет к их сцеплению (и, следовательно, не произойдет образование агломерата, способного перекрыть межискровую зазор).

Эффективными частицами шлама могут называться частицы, имеющие размеры, равные или превышающие половину величины межэлектродного промежутка (25 мкм и более) или имеющие несферическую форму (рис. 6а, б, в). Размеры таких частиц невозможно задать одним лишь параметром, как в случае с частицами сферической формы (диаметр), их необходимо описывать несколькими параметрами.

Эффективные частицы шлама способны объединяться друг с другом, образуя более крупные агломераты из-за неровностей своей поверхности. Частицы, имеющие сферическую форму и размеры, равные или превышающие половину величины межискрового зазора, способны перекрыть межискровую промежуток, особенно, когда амплитуда колебания проволоки достигает половины межискрового промежутка [17].

Таким образом, приведенная классификация частиц шлама позволяет определить потенциально

опасные частицы, учитывая их способность к образованию мостиков сварки, которые, в свою очередь, вызывают короткое замыкание, обуславливающее обрыв проволоки.

Выводы и заключение

На основании полученных данных растровой электронной микроскопии и лазерного дифракционного анализа возможно сделать следующие выводы:

1. Средние значения размеров составили $25,04 \pm 5,26$ мкм для частиц шлама, собранного со стола, и $20,97 \pm 15,10$ мкм — для частиц шлама, собранного со дна ванны. Размеры частиц, определенные методом лазерного дифракционного анализа, варьируются от 0,1 мкм до 250 мкм. Размеры частиц, идентифицированные методом растровой электронной микроскопии, согласуются с данными распределения частиц по размерам, полученными методом лазерного дифракционного анализа.

2. Относительная доля эффективных частиц, обладающих критическими размерами (более 25 мкм) и наиболее вероятно способствующих образованию мостика сварки, составляет 35 % (для частиц шлама, собранного со стола) и 45 % (для частиц шлама, собранного со дна ванны).

3. Результаты анализа элементного состава частиц шлама, собранного со стола и со дна ванны, соответствуют материалу латунной проволоки (Cu — 65 %, Zn — 35 %), используемой в качестве электрода-инструмента.

Проведенные исследования гранулометрического состава и морфологии частиц шлама позволят в дальнейшем определить механизм формирования мостика сварки при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке. Более того, анализ элементного состава частиц позволит определить электро- и теплопроводность мостика, необходимых для прогнозирования распределения температуры и энергии в проволочном электроде-инструменте при плавлении мостика сварки в условиях короткого замыкания.

Список источников / References

1. Obara H. Detection of Discharging Position in Wire EDM. *ISEM 10th*, 1992. 1992;404. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573105974921743872>.
2. Obara H. An attempt to detect wire temperature distribution during wire EDM. *Proc. of ISEM-11*. 1995;67. <https://doi.org/10.2526/jseme.28.21>.
3. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M. Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. *CIRP Annals*. 2005;54(2):64–87. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60020-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60020-1).
4. Dekeyser W., Snoeys R., Jennes M. A thermal model to investigate the wire rupture phenomenon for improving performance in EDM wire cutting. *Journal of Manufacturing Systems*. 1985;4(2):179–190. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(85\)90024-X](https://doi.org/10.1016/0278-6125(85)90024-X).

5. Abhilash P. M., Chakradhar D. Failure detection and control for wire EDM process using multiple sensors. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021;33:315–326. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.04.009>.

6. Kumar R., Singh I. Productivity improvement of micro EDM process by improvised tool. *Precision Engineering*. 2018;51:529–535. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.10.008>.

7. Kunieda M., Yanatori K. Study on Debris Movement in EDM Gap. *International Journal of Electrical Machining*. 1997;2:43–49.

8. Dong L., Zhigang L., Yiqing W. [et al.]. Study on the movement rule of discharge products in large area titanium alloy machining by electrical discharge machining. *Journal of Mechanical Engineering*. 2017;53(21):200–208. <https://doi.org/10.3901/JME.2017.21.200>.

9. Li Z., Bai J. Influence of alternating side gap on micro-hole machining performances in micro-EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;94(1):979–989. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0959-9>.

10. Tanjilul M., Afzaal Ahmed, Senthil Kumar A. [et al.]. A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;255:263–274. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.016>.

11. Wang J., Sánchez J. A., Wang Z. [et al.]. Observations on debris composition and size distribution in WEDM. *Procedia CIRP*. 2020;95:331–336. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.323>.

12. Iwai H., Ebisu T., Okada A. [et al.]. Influence of nozzle jet flushing on working fluid flow and wire electrode in trim-cut WEDM. *Procedia CIRP*. 2020;95:250–254. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.267>.

13. Fujimoto T., Okada A., Okamoto Y. [et al.]. Optimization of nozzle flushing method for smooth debris exclusion in wire EDM. *Key Engineering Materials*. 2012;516:73–78. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.516.73>.

14. Okada A., Uno Y., Onoda S., Habib S. Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf. *CIRP Annals*. 2009;58(1):209–212. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.003>.

15. Yoshida M., Kunieda M. Study on the distribution of scattered debris generated by a single pulse discharge in EDM process. *International Journal of Electrical Machining*. 1998;3:39–47.

16. Fedorov A. A., Linovsky A. V., Morgunov A. P. The influence of steel 35 wire EDM parameters on the surface roughness and morphology. *Journal of Mechanical Engineering*. 2017;14(2):37–49. EDN: UYСJHE.

17. Zhang G., Li H., Zhang Zh. [et al.]. Vibration modeling and analysis of wire during the WEDM process. *Machining Science and Technology*. 2016;20(2):173–186. <https://doi.org/10.1080/10910344.2015.1085312>.

Вклад авторов:

Ю. О. Бредгауэр. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, проведение лабораторных исследований на проволочном электроэрозионном станке Sodick VZ 300L, анализ результатов исследования, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

А. А. Федоров. Проведение лабораторных исследований на проволочном электроэрозионном станке Sodick VZ 300L, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

Д. А. Полонянкин. Проведение лабораторных исследований частиц шлама методами растровой электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и лазерного дифракционного анализа, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

Authors' contribution:

Iuliia O. Bredgauer. Setting research goal and objectives, analysing the state of the issue, conducting laboratory research on a Sodick VZ 300L wire electrical discharge machine, analysing research results, formulating conclusions, preparing the text of the article.

A. A. Fedorov. Conducting laboratory research on a Sodick VZ 300L wire electrical discharge machine, analysing research results, preparing the text of the article.

D. A. Polonyankin. Conducting laboratory studies of debris particles using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy and laser diffraction analysis, analysing the results of the study, preparing the text of the article.

Информация об авторах:

БРЕДГАУЭР Юлия Олеговна, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 8551-8356

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0267-8179>

AuthorID (SCOPUS): 57208868308

ResearcherID: ABF-3261-2020

e-mail: jobredgauer@omgtu.ru

ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4626-9660

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6681-087X>

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

e-mail: aafedorov@omgtu.ru

ПОЛОНЯНИН Денис Андреевич, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8251-9838

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6799-3105>

AuthorID (SCOPUS): 57201867901

ResearcherID: B-3236-2014

e-mail: dapolonyankin@omgtu.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 17.11.2025; одобрена после рецензирования 24.04.2026; принята к публикации 15.05.2026.

Information about the authors:

BREDGAUER Iuliia Olegovna, Senior Lecturer of the Mechanical Engineering Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 8551-8356

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0267-8179>

AuthorID (SCOPUS): 57208868308

ResearcherID: ABF-3261-2020

e-mail: jobredgauer@omgtu.ru

FEDOROV Aleksey Arkad'yevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4626-9660

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6681-087X>

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

e-mail: aafedorov@omgtu.ru

POLONYANKIN Denis Andreevich, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 8251-9838

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6799-3105>

AuthorID (SCOPUS): 57201867901

ResearcherID: B-3236-2014

e-mail: dapolonyankin@omgtu.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 17.11.2025; approved after reviewing 24.04.2026; accepted for publication 15.05.2026.

ПЛАЗМЕННО-ЖИДКОСТНАЯ СВАРКА ЛАТУННЫХ ПЛАСТИН

Д. Ф. Ахунов✉, М. Н. Семенов, А. Р. Мухаметзянов

Казанский государственный энергетический университет,
Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51

✉ 79273521546@mail.ru

В статье рассматривается применение плазменно-жидкостной системы с твердыми и жидкими электродами для сварного соединения пластин из латуни. Цель работы — исследование возможности сварки латунных пластин с применением метода плазменно-жидкостной сварки с твердыми и жидкими электродами.

Продemonстрирована экспериментальная установка для получения сварного соединения, которая в дальнейшем может быть использована для создания промышленных установок плазменной сварки. Приведены используемые методы исследования, такие как сканирующая электронная микроскопия, позволяющая исследовать структуру сварного шва, а также проверка на твердость сплава по Виккерсу с помощью микротвердомера. Проведен подробный анализ вольт-амперных характеристик, на основе которого выявлено, что в процесс сварки участвует дуговой разряд.

Представленные результаты экспериментов демонстрируют потенциал данного метода и показывают наиболее оптимальные параметры сварки (напряжение не менее 500 В, ток до 120 А). Полученный сварной шов имел небольшие газовые поры, но структура оставалась как у основного металла. В заключение представлены предложения по развитию метода, такие как применение смеси различных солей и кислот в составе электролита и использование вакуумной камеры, для минимизации окисления металла.

Ключевые слова: плазменно-жидкостная сварка, плазменные системы, методы сварки, электрический пробой, хлорид натрия, латунь, вольт-амперная характеристика

Для цитирования: Ахунов Д. Ф., Семенов М. Н., Мухаметзянов А. Р. Плазменно-жидкостная сварка латунных пластин. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 49–55. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-49-55>. EDN: TEJJYV.



© Ахунов Д. Ф., Семенов М. Н., Мухаметзянов А. Р., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PLASMA-LIQUID WELDING OF BRASS PLATES

D. F. Akhunov✉, M. N. Semenov, A. R. Mukhametzyanov

Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51, Kazan, 420066, Russia

✉ 79273521546@mail.ru

The article discusses the use of a plasma-liquid system with solid and liquid electrodes for welding plates of brass. The purpose of the research is to study the possibility of welding brass plates using the method of plasma-liquid welding with solid and liquid electrodes.

The authors demonstrate an experimental installation for producing a welded joint, which can later be used to create industrial plasma welding installations. The research methods are presented, such as scanning electron microscopy, which allow analysing the structure of the weld, as well as checking the hardness of the alloy according to Vickers' microhardness tester. Moreover, the authors present a detailed analysis of the voltage features, on the basis of which it is revealed that an arc discharge is involved in the welding process.

The experimental results demonstrate the potential of the method and show the most optimal welding parameters (voltage not less than 500 V, current up to 120 A). The resulting weld has small gas pores, but the structure remains similar to that of the base metal. In conclusion, the authors propose the development options of the method, such as the use of a mixture of various salts and acids in the electrolyte and the use of a vacuum chamber to minimize metal oxidation.

Keywords: plasma-liquid welding, plasma systems, welding methods, electrical breakdown, sodium chloride, brass, volt-ampere features

For citation: Akhunov D. F., Semenov M. N., Mukhametzyanov A. R. Plasma-liquid welding of brass plates. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):49–55. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-49-55>. EDN: TEJYV. (In Russ.).



© Akhunov D. F., Semenov M. N., Mukhametzyanov A. R., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Латунь марки Л63, обладающая преимущественно содержанием меди 62–65 % и цинка в оставшейся части, благодаря своим уникальным свойствам нашла широкое применение в различных отраслях производства. Материал ценится своей пластичностью, коррозионной стойкостью, электропроводностью, но на сегодняшний день стоит вопрос по улучшению способов сварки и качества сварного шва латунных изделий [1, 2].

С целью преодоления указанных проблем в промышленности применяется ряд различных методов. Наиболее распространёнными являются дуговая сварка вольфрамовым электродом в инертном газе и дуговая сварка плавящимся электродом. Часто в данном методе используются промежуточные присадочные материалы, которые снижают термомеханические напряжения и подавляют образование интерметаллидов. Однако даже при этом сложно избежать дефектов, особенно при сварке толстостенных изделий или при отсутствии строгого контроля теплового режима. Существуют и высокотехнологичные методы: лазерная и электронно-лучевая сварка. Они обеспечивают высокую плотность энергии, узкую зону расплава и минимальное тепловложение, что позволяет обойти проблемы, связанные с высокой теплопроводностью латуни и склонностью к образованию дефектов. Тем не менее эти технологии требуют дорогостоящего оборудования, высокой точности изготовления и сборки деталей и, как правило, проведения процесса в вакууме, что ограничивает их применение в массовом производстве [3].

На сегодняшний день появились и новые экспериментальные методы: сварка с помощью электрических разрядов с твердыми и жидкими электродами [4, 5]. Данный вид разрядов нашел применение не только в сварке¹, но и в предварительной очистке свариваемых деталей, а также в способе добычи водорода² [6]. В основе метода находится использование плазмы, генерируемой в электролите, что позволяет достигать высоких температур и обеспечивать качественное соединение различных материалов [7, 8], включая трудно свариваемые сплавы, которые тяжело поддаются сварке другими способами, например, титановые и алюминиевые сплавы [9, 10]. В отличие от традиционных методов сварки, таких как дуговая или лазерная сварка, данный метод позволяет минимизировать тепловое воздей-

ствие на материал, что снижает риск деформаций и улучшает механические свойства сварного шва [11, 12], а также позволяет достичь высокую степень однородности структуры сварного шва, что положительно сказывается на его прочностных характеристиках [13, 14]. Кроме того, в исследованиях [15, 16] рассматриваются вопросы предотвращения образования дефектов, таких как поры и трещины, которые могут возникать при сварке высоколегированных сталей и сплавов [17].

Таким образом, цель работы — исследование возможности сварки латунных пластин с применением метода плазменно-жидкостной сварки с твердыми и жидкими электродами при атмосферном давлении, а также изучение механизма протекания процесса сварки на основе полученных данных токов и напряжения и определение прочностных характеристик сварного соединения, по результатам которых могут быть выявлены дальнейшие этапы по доработке используемой установки.

Экспериментальная установка и результаты

В рамках работы были описаны исследования по сварке изделий из латуни марки Л63, содержащей в своем составе около 63 % меди.

Сварка проводилась на специально разработанной экспериментальной установке, оснащённой газоразрядной камерой (рис. 1). Основу технологического процесса составляет контактный метод, в котором свариваемые детали 2 выполняют роль катода, а электролит 3 — анода. Для обеспечения положительного потенциала в электролите используется нержавеющая пластина 4 из стали «AISI 304» (200×120×1,5 мм). Подготовка установки к проведению эксперимента завершается подачей электрического тока от внешнего источника питания 1, после чего начинается сварка. Температурный режим электролита контролируется с помощью термостатической системы, в состав которой входит циркуляционный охладитель, обеспечивающий поддержание заданной температуры в течение всего процесса. Обновление и равномерное распределение компонентов электролита осуществляется посредством замкнутой системы циркуляции. Для предотвращения накопления механических примесей в электролите установлена система фильтрации, включающая фильтр грубой очистки. Пары электролита удаляются при помощи вытяжной вентиляции. Изменение значения напряжения про-

¹Пат. 2751500 С1 Российская Федерация, МПК В 23 К 9/23, В 23 К 28/02, В 23 К 103/10. Способ электролитно-плазменной сварки цветных металлов и их сплавов / Гайсин Аз. Ф., Гайсин Ал. Ф., Багаутдинова Л. Н. [и др.]. № 2020139509; заявл. 24.05.2024; опублик. 30.10.2024. EDN: HURDES.

²Пат. 2833435 С1 Российская Федерация, МПК С 25F 3/24. Способ электролитно-плазменной обработки поверхности детали из легированной стали / Мингажев А. Д., Крюков Н. К., Астанин В. В. [и др.]. № 2024118540; заявл. 03.07.2024; опублик. 21.01.2025. EDN: LFNGWS.

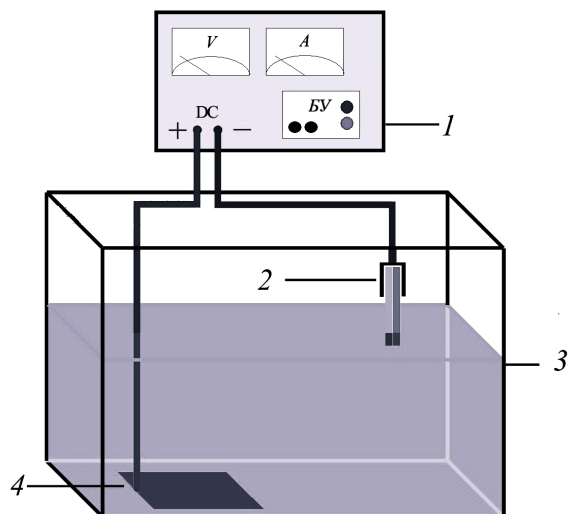


Рис. 1. Схема экспериментальной установки
Fig. 1. Scheme of the experimental setup

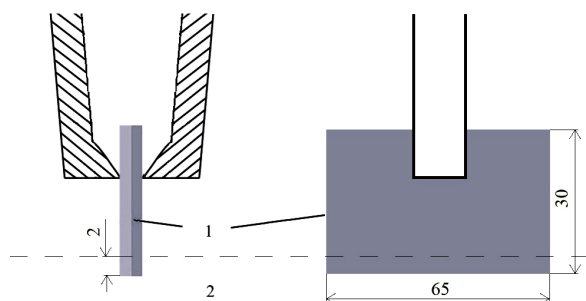


Рис. 2. Схема крепления свариваемых деталей
Fig. 2. Fixing scheme of welded parts

исходит при помощи делителя напряжения, ручка которого выведена на переднюю панель корпуса. На ней же установлен таймер с шагом в 1 секунду, при помощи которого устанавливалось время сварки деталей. Измерение электрических параметров производилось с использованием аналоговых вольтметра и амперметра. В целях обеспечения электробезопасности установка заземлена, все эксперименты проводятся с использованием средств индивидуальной защиты.

Схема крепления свариваемых деталей представлена на рис. 2. Детали 1 представляли собой пластины из латуни размерностью 30×65 мм и толщиной 1 мм. В качестве электролита 2 применялся 5 % раствор хлорида натрия (NaCl), разбавленный в водопроводной воде, при комнатной температуре 23 °. Свариваемые части пластин погружались в электролит на глубину 2 мм.

В процессе эксперимента использовались следующие средства и методы научного исследования:

1. Видеосъемка процессов сварки и показаний аналоговых амперметра и вольтметра производилась с помощью камеры смартфона марки «Huawei Nova 5T» с частотой 30 кадров в секунду при разрешении 1920×1080 пикселей. Телефон устанавливался на штатив на расстоянии 200 мм от зоны горения разряда. Снятые видеоматериалы обрабатывались на компьютере с использованием программного обеспечения «Microsoft Climpchamp».

2. Абразивная резка полученного сварного шва производилась на настольном отрезном стан-

ке с вращающимся шлифовальным алмазным диском «Delta™ AbrasiMet® Abrasive Cutter» фирмы «Buehler», предназначенном для подготовки металлографических образцов.

3. Прецизионная резка образца для получения резов равной толщины с точностью 2 мкм, осуществлялась с использованием высокоточного отрезного станка «IsoMet 5000» фирмы «Buehler».

4. Перед проведением анализа на твердость образцы проходили этап предварительной опрессовки на автоматизированном станке «SimpliMet 3000» фирмы «Buehler» методом горячей запрессовки в термореактивную/термопластичную смолу.

5. Прецизионная обработка образца обеспечивалась при помощи автоматической двухдисковой шлифовально-полировальной машины «Mecatech 264» фирмы «Buehler».

6. Для изучения микротвердости сварного образца применялся микротвердомер «DUH-211S».

7. Для изучения структуры применялся сканирующий электронный микроскоп «AURIGA CrossBeam» фирмы «Carl Zeiss».

8. Измерение напряжения производилось стрелочным индикатором напряжения «Э47 500В (IEK)» класса точности 1,5. Измерение силы тока производилось стрелочным индикатором напряжения «M1001 0-200 А» с классом точности 1,5.

9. Построение характеристики зависимости напряжения и силы тока со временем были проведены при помощи лицензионного программного обеспечения «Microsoft Office Excel». Аппроксимация вольт-амперной характеристики производилась в программном обеспечении «Visual Studio Code» на языке Python с применением библиотек NumPy и Matplotlib.

В целях получения наиболее оптимальных результатов эксперименты по плазменно-жидкостной сварке проводились в трёх различных настройках переменного резистора: на минимальном, среднем и максимальном уровнях сопротивления, что позволило оценить влияние электрических параметров на стабильность процесса и качество соединений.

В конфигурации максимального сопротивления резистора в начальные секунды эксперимента регистрировались процессы, аналогичные электрохимическому электролизу в межэлектродном зазоре, с фиксированным значением тока и повышенным напряжением около 395 В. Далее происходил спонтанный пробой зазора, приводящий к формированию разряда пульсирующего типа. Амплитуда колебаний тока в этом случае составляла 20—40 А, что способствовало нестабильности сварочного процесса: возникали локальные зоны интенсивного расплавления материалов, но общая картина сварки оставалась хаотичной с неоднородным распределением тепла. В результате на латунных пластинах образовывался дефектный шов с визуально заметными пустотами. Длительность такого режима определялась таймером в 5 с, однако из-за неконтролируемого характера разряда процесс не обеспечивал равномерного проплавления.

Конфигурация среднего сопротивления резистора продемонстрировала оптимальные условия для проведения сварки. Здесь фиксировался контролируемый подъём напряжения 500 В и выше, за которым следовал стабильный пробой межэлектродного пространства. Разряд проявлялся в импульсном режиме при силе тока 120 А, формируя вокруг свариваемых элементов парогазовую оболочку с интенсивным свечением. Это способствовало

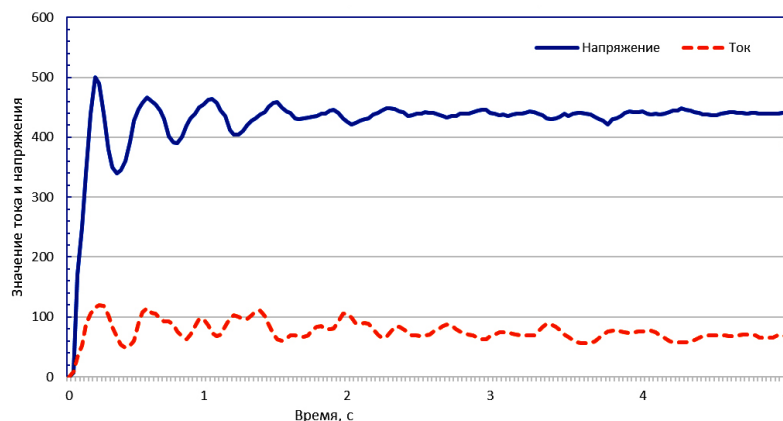


Рис. 3. Зависимость тока и напряжения от времени
Fig. 3. Dependence of current and voltage on time

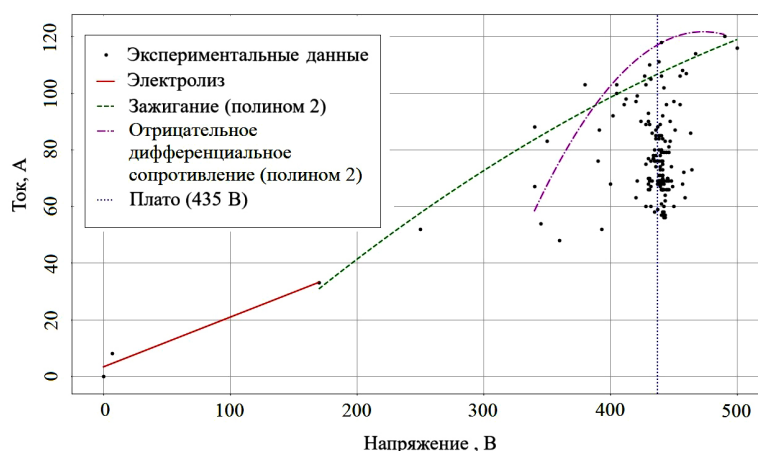


Рис. 4. Аппроксимация вольт-амперной характеристики
Fig. 4. Approximation of the volt-ampere features

равномерному нагреву и плавлению поверхностей без чрезмерных локальных перегревов. Сварка осуществлялась в течение 5 секунд по установленному времени, приводя к формированию качественного шва с минимальными дефектами.

В конфигурации минимального сопротивления резистора параметры электрического поля выходили за пределы оптимальных значений: напряжение достигало не менее 500 В, а пиковое значение тока — 150 А, что вызывало немедленный пробой зазора. Процесс сварки укладывался в 3,5 секунды, однако избыточная энергия приводила к чрезмерному расплавлению материалов вдоль линии контакта пластин. В результате шов формировался с чрезмерной глубиной проплавления, сопровождаемой значительными тепловыми деформациями и риском разрушения структуры. Визуальный контроль готового изделия выявил признаки пережога в прилегающих зонах, что делает этот режим менее предпочтительным для точной сварки, несмотря на высокую скорость соединения. Увеличение времени сварки приводит лишь к ухудшению сварного шва.

Для получения представления о механизмах формирования разрядов рассмотрим зависимость электрического тока и напряжения от времени (рис. 3).

Анализ формы кривых позволяет выделить три отчетливых этапа в процессе сварки. Начальный этап (0—0,25 с) характеризуется стремительным нарастанием как напряжения, так и силы тока, что

знаменует собой начало переходного процесса. Далее происходит пробой межэлектродного промежутка, достигаются пиковые значения: 500 В и выше для напряжения при силе тока 120 А. Время достижения пробоя $\approx 0,25$ с.

Второй этап (0,25—2,25 с) отражает стабилизацию режима сварки, отличающийся выраженными колебаниями тока и напряжения, где значения тока падали до 53 А, напряжения — до 340 В соответственно. По мере приближения к завершению этого этапа амплитуда колебаний уменьшается, и график постепенно приобретает линейную форму. При этом высокие значения силы тока наблюдаются при низких значениях напряжения и наоборот. Данный этап продолжался приблизительно 2 с после момента пробоя.

Последним этапом является переход к устойчивому режиму сварки, где изменения становятся минимальными. Напряжение и ток демонстрируют лишь небольшие колебания со средними значениями 435 В и 85 А соответственно. В течение этого периода наблюдается устойчивое горение дуги без каких-либо существенных возмущений. В конце данного этапа процесс сварки завершается, происходит автоматическое отключение оборудования. Именно третий этап является основным рабочим интервалом, в течение которого происходит непрерывный нагрев пластин из электротехнической стали. Длительность этого этапа составляет приблизительно 3 с.

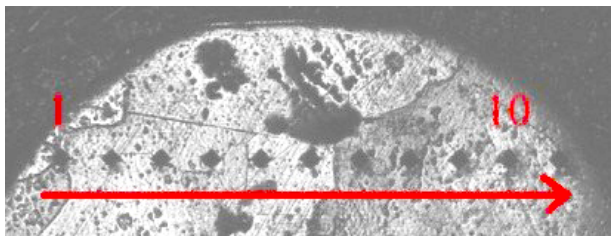


Рис. 5. Линия измерения микротвердости по Виккерсу
Fig. 5. Line of the Vickers microhardness measurement

Таблица 1. Значения микротвердости сварного шва
Table 1. Microhardness values of the weld

Точка	HV	Точка	HV
1	113,76	6	149,88
2	114,39	7	137,65
3	126,81	8	124,72
4	129,12	9	118,41
5	136,36	10	113,06

Далее была проведена аппроксимация вольт-амперной характеристики на основе экспериментальных данных. Из анализа полученных графиков (рис. 4) следует, что кривая вольт-амперной характеристики состоит из нескольких характерных участков, каждый из которых соответствует определенной физической стадии разрядного процесса.

В начальной области наблюдается линейный участок, типичный для процесса электролиза, — здесь ток обусловлен ионной проводимостью электролита, а рост напряжения пропорционален увеличению тока в соответствии с законом Ома.

Следующий линейный участок сопровождается более резким возрастанием тока, что приводит к зажиганию разряда.

Далее наблюдается переход в нелинейную область, аппроксимированную полиномом второго порядка. Эта часть кривой соответствует падению напряжения до 480 В, сопровождающегося повышением тока до максимальных 120 А. Данное явление соответствует формированию зоны отрицательного дифференциального сопротивления. В этой области характерно обратное поведение: при уменьшении напряжения наблюдается рост тока, что свидетельствует о быстрой ионизации газовой фазы и формировании проводящего канала. Такое поведение типично для перехода от тлеющего разряда к дуговому.

Дальнейшее падение напряжения приводит к падению значений тока до 50 А.

Завершающий участок вольт-амперной характеристики представляет собой почти горизонтальное «плато» с усредненным напряжением около 435 В, при котором ток стабилизируется в диапазоне ~80–90 А. Именно в этом режиме осуществляется основной процесс сварки, характеризующийся устойчивым горением разряда и интенсивным тепловыделением в межэлектродном промежутке.

На основании совокупности полученных данных можно сделать вывод, что наблюдаемый разряд представляет собой дуговой разряд в парогазовом пузыре, формирующемся над поверхностью электролита под действием локального нагрева. Этапу дугового горения предшествует кратковременный тлеющий разряд на стадии инициации, обеспечи-

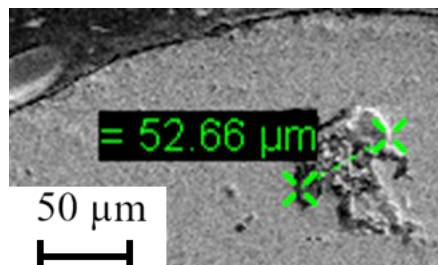


Рис. 6. Максимальная из пустот в сварном соединении
Fig. 6. Maximum of the voids in the welded joint

вающий первоначальную ионизацию межэлектродного зазора.

Основной ток в устойчивом режиме протекает через плазменный канал, образованный ионизированными парами электролита и газов. Резкий рост тока при относительно стабильном напряжении обусловлен активной термоэлектронной эмиссией с поверхности катода, а также термической ионизацией газовой среды в условиях высокой температуры плазмы (до нескольких тысяч кельвинов). Эти процессы обеспечивают высокую электропроводность канала и устойчивость дуги, что является ключевым условием для качественного формирования сварного соединения.

Далее было проведено измерение твердости сплава по Виккерсу по 10 точкам (рис. 5) вдоль сварного шва. Расстояние между точками составляло 150 мкм. Результаты сведены в табл. 1.

Также в качестве референсного было определено среднее значение твердости латуни до сварки, полученное по трем точкам у каждой из пластин, составившее 107,61 HV. Как следует из данных в табл. 1 микротвердость в зоне сварного шва превышает твердость основного металла, но наблюдается четкая закономерность — с приближением к краям образца значение твердости постепенно снижается. Максимальная твердость получилась 149,88 HV в точке 6 в центральной части соединения. Среднее значение микротвердости по всем измеренным точкам составило 126,42 HV, что на ~15 % выше, чем у исходного материала.

Анализ изображений с микроскопа показал, что сварной шов имеет округлую форму и содержит отдельные пустоты. Наибольшая из выявленных полостей (рис. 6) достигает размера 52,66 мкм. Более того, в структуре шва наблюдаются мелкие поры диаметром до 6 мкм, образование которых, вероятно, связано с выделением газов в процессе горения электрического разряда. В целом микроструктура сварного соединения схожа со структурой исходных свариваемых материалов, но четкой границы раздела между зоной шва и основным металлом не выявлено, что может свидетельствовать о хорошей взаимной диффузии компонентов и однородности полученного соединения.

Заключение

Исследование по свариванию с помощью метода плазменно-жидкостной сварки пластин латуни позволило сделать следующие выводы:

1. Из анализа вольт-амперной характеристики выявлено, что процесс сопровождался устойчивым дуговым разрядом. Изменения напряжения и тока во времени были взаимосвязаны, но происходили

не синхронно. Эксперимент характеризовался тремя этапами: начальный — резкое возрастание тока и напряжения с последующим пробоем; переходный — стабилизация режима сварки; рабочий — устойчивое горение разряда. Сама сварка происходит на последнем этапе при средних значениях напряжения и тока 435 В и 85 А соответственно.

2. Показатели микротвердости шва имеют неравномерное распределение. На краях соединения показатели находятся на значении более 113 HV, тогда как в центральной зоне шва твердость достигает 149,88 HV. Среднее значение твердости соединения 126,416 HV превышает среднее значение из начальных пластин 107,61 HV.

3. Макро- и микроструктурный анализ выявил наличие газовых пор в объеме шва, максимальный размер которых достигал 53 мкм. Несмотря на это, микроструктура сварной зоны сохраняет полное соответствие структуре основного металла — признаков рекристаллизации, фазовых превращений или образования вторичных фаз не обнаружено. Это указывает на то, что тепловложение оставалось в пределах, не вызывающих существенных структурных изменений в латуни.

4. Полученные результаты могут применяться для дальнейшего изучения данного метода сварки. В частности, они могут быть использованы при построении математических моделей тепломассопереноса, формировании шва и эволюции механических свойств. Дальнейшее развитие метода предполагает эксперименты с подбором состава электролита, таких как смеси из нескольких солей или кислот для получения лучшего качества сварного соединения. Также рассматривается возможность усовершенствования экспериментальной установки для возможности проведения экспериментов в вакууме, что позволит минимизировать окисление и газонасыщение металла шва.

Следовательно, метод плазменно-жидкостной сварки демонстрирует потенциал для соединения медных сплавов, требуя при этом дальнейшей оптимизации технологических параметров для достижения промышленно приемлемого качества сварных швов.

Финансирование / Funding

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-19-00453).

The research was supported by the Russian Science Foundation (Agreement No. 14-19-00453).

Список источников / References

1. Певзнер М. З., Грачёв С. П., Иванов-Польский К. В. [и др.]. О качестве высокочастотной сварки латунных труб // Механическое оборудование металлургических заводов. 2018. № 2 (11). С. 22–31. EDN: AIWRHQ.

Pevzner M. Z., Grachev S. P., Ivanov-Polsky K. V. [et al.]. Quality of high-frequency welding of brass pipes. *Mekhanicheskoye Oborudovaniye Metallurgicheskikh Zavodov*. 2018;2(11):22–31. EDN: AIWRHQ. (In Russ.).

2. Малахов А. Ю., Сайков И. В., Денисов И. В. Особенности границы соединения биметалла латунь-инвар, полученного сваркой взрывом // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 1. С. 19–23. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2021-1-19-23>. EDN: DSUDOR.

Malakhov A. Yu., Saikov I. V., Denisov I. V. Features of the boundary of the brass-invar bimetal compound obtained by explosion welding. *Deformation and Destruction of Materials*.

2021;1:19–23. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2021-1-19-23>. EDN: DSUDOR. (In Russ.).

3. Коротеев А. О., Фетисова Е. А., Коротеева А. А., Клименкова А. В. Механические характеристики наплавленного металла при дуговой сварке высокопрочных сталей с модификацией защитной газовой среды газообразным флюсом SF₆ // Вестник Белорусско-Российского университета. 2025. № 1 (86). С. 23–31. <https://doi.org/10.24412/2077-8481-2025-1-23-31>. EDN: HBIXYW.

Koroteev A. O., Fetisova E. A., Koroteeva A. A., Klimenkova A. V. Mechanical characteristics of deposited metal in arc welding of high-strength steels with modification of shielding gas environment by SF₆ gaseous flux. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta*. 2025;1(86):23–31. <https://doi.org/10.24412/2077-8481-2025-1-23-31>. EDN: HBIXYW. (In Russ.).

4. Басыров Р. Ш., Багаутдинова Л. Н., Гайсин Ф. М. [и др.]. Моделирование электрофизических процессов в системе электролит–металлический электрод // Теплофизика высоких температур. 2025. Т. 63, № 1. С. 11–15. <https://doi.org/10.7868/s3034610x25010022>. EDN: UEYOYE.

Basyrov R. Sh., Bagautdinova L. N., Gaysin F. M. [et al.]. Modelirovaniye elektrofizicheskikh protsessov v sisteme elektrolit–metallicheskiy elektrod. *High Temperature*. 2025;63(1):11–15. <https://doi.org/10.7868/s3034610x25010022>. EDN: UEYOYE. (In Russ.).

5. Багаутдинова Л. Н., Бельгибаев Э. Р., Гайсин Ал. Ф. [и др.]. Электрические разряды в электролитно-пузырьковой среде раствора сульфата аммония в водопроводной воде при атмосферном давлении // Теплофизика высоких температур. 2024. Т. 62, № 3. С. 474–476. <https://doi.org/10.31857/S0040364424030162>. EDN: DIDQAZ.

Bagautdinova L. N., Bel'gibayev E. R., Gaysin Al. F. [et al.]. Elektricheskiye razryady v elektrolitno-puzyr'kovoy srede rastvora sulfata ammoniya v vodoprovodnoy vode pri atmosfernom davlenii. *High Temperature*. 2024;62(3):474–476. <https://doi.org/10.31857/S0040364424030162>. EDN: DIDQAZ. (In Russ.).

6. Гайсин А. Ф., Гайсин Ф. М., Багаутдинова Л. Н. [и др.]. Плазменно-электролитные разряды в газожидкостной среде для получения водорода // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23, № 2. С. 27–35. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-27-35>. EDN: SHARHP.

Gaysin A. F., Gaysin F. M., Bagautdinova L. N. [et al.]. Plasma-electrolyte discharges in a gas-liquid medium for the production of hydrogen. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021;23(2):27–35. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-27-35>. EDN: SHARHP. (In Russ.).

7. Cai B., Fu J., Zhao Y. [et al.]. Effect of Alternating Magnetic Field on Arc Plasma Characteristics and Droplet Transfer during Narrow Gap Laser-MIG Hybrid Welding. *Metals*. 2021;11(11):1712. <https://doi.org/10.3390/met11111712>.

8. Huang A., Zhang J., Gao C. [et al.]. Effects of groove constraint space on plasma characteristics during Laser-MIG hybrid welding of Titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;48:137–144. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.004>.

9. Semenov M. N., Belgibaev E. R., Kayumov R. R. [et al.]. Plasma-Liquid Welding of Copper Products. *High Energy Chemistry*. 2024;58(S3):S400–S403. <https://doi.org/10.1134/S0018143924701236>.

10. Ha M. H., Do H. T., Vu D. [et al.]. The Experimental Research on Plasma Welding of SUS 304 Stainless Steel Thin Plates. *Advances in Engineering Research and Application*. 2022;602:942–951. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22200-9_100.

11. Hong X., Huang B., Li T. [et al.]. Optimization of plasma arc welding process parameters of SAF 2507/316L dissimilar steel based on response surface method. *Welding in the World*. 2023;67:2493–2509. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3020034/v1>.

12. Zhubaev A. K., Rakhmetolla G. A., Sagynova A. O. [et al.]. Study of Phase Formation in Bilayered Three Component System. *High Energy Chemistry*. 2024;58(S3):S475–S477. <https://doi.org/10.1134/S0018143924701406>.

13. Akhmadullina L. I., Gaisin Az. F., Gaisin Al. F. [et al.]. Electrolyte-plasma product treatment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1588(1):012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1588/1/012012>.

14. Hong X., Huang B., Li T. [et al.]. Effects of Welding Speed and Welding Current on the Residual Stress and Deformation of SAF 2507/316L Dissimilar Plasma Arc Welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2024; 33(24):13745–13763.

15. Лукьянова Н. А., Мельников П. В., Грибков О. И. Влияние отпуска на структуру и свойства сварных соединений низколегированных высокопрочных сталей, выполненных ручной аргодуговой сваркой // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022. № 10 (808). С. 69–74. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.10.69-74>. EDN: ZBKUIT.

Luk'yanova N. A., Melnikov P. V., Gribkov O. I. Effect of tempering on the structure and properties of welded joints of low-alloy high-strength steels formed by gas tungsten arc welding. *Metallovedeniye i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2022;10(808):69–74. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.10.69-74>. EDN: ZBKUIT. (In Russ.).

16. Овчинников В. В., Растопчин Р. Н. Плазменная сварка высокопрочных алюминиевых сплавов // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2020. № 7 (109). С. 3–11. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-7-3-11>. EDN: UTFUBB.

Ovchinnikov V. V., Rastopchin R. N. Plasma welding of high-strength aluminum alloys. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2020;7(109):3–11. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-7-3-11>. EDN: UTFUBB. (In Russ.).

17. Бельгибаев Э. Р., Семенов М. Н., Каюмов Р. Р. [и др.]. Плазменно-жидкостная сварка изделия из электротехнической стали // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2024. № 7 (829). С. 62–68. <https://doi.org/10.30906/mitom-2024-7-62-68>. EDN: DUKXOY.

Belgibaev E. R., Semenov M. N., Kayumov R. R. [et al.]. Plasma-liquid welding of electrical steel plates. *Metallovedeniye i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2024;7(829):62–68. <https://doi.org/10.30906/mitom-2024-7-62-68>. EDN: DUKXOY. (In Russ.).

Вклад авторов:

Д. Ф. Ахунов. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, обработка экспериментальных данных, расчет аппроксимации вольт-амперной характеристики, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

М. Н. Семенов. Разработка экспериментальной установки, разработка методов исследования, анализ экспериментальных данных токов и напряжения.

А. Р. Мухаметзянов. Литературный поиск по теме исследования, снятие и анализ экспериментальных данных структуры и твердости сварного шва, подготовка рисунков и таблиц.

Authors' contribution:

Denis F. Akhunov. Setting research goal and objectives, analysing the status of the problem, processing experimental data, calculating the approximation of the voltamper features, formulating conclusions and preparing the text of the article.

Maxim N. Semenov. Development of an experimental setup and research methods, analysis of experimental current and voltage data.

Aydar R. Mukhametzyanov. Literature analysis, analysis of experimental data on the structure and hardness of the weld, preparing images and tables.

Информация об авторах:

АХУНОВ Денис Фирдависович, аспирант кафедры «Физика» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань.

SPIN-код: 5107-4467

AuthorID (РИНЦ): 1264015

ResearcherID: JOJ-7789-2023

e-mail: 79273521546@mail.ru

СЕМЕНОВ Максим Николаевич, аспирант кафедры «Физика» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань.

SPIN-код: 8738-8276

AuthorID (РИНЦ): 1219846

e-mail: maxim.snt@inbox.ru

МУХАМЕТЗЯНОВ Айдар Раисович, аспирант кафедры «Физика» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань.

SPIN-код: 9915-7304

AuthorID (РИНЦ): 1219847

e-mail: aydar-999@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 11.02.2026; принята к публикации 12.05.2026.

Information about the authors:

AKHUNOV Denis Firdavisovich, Postgraduate of the Physics Department, Kazan State Power Engineering University, Kazan.

SPIN-code: 5107-4467

AuthorID (RSCI): 1264015

ResearcherID: JOJ-7789-2023

e-mail: 79273521546@mail.ru

SEME NOV Maxim Nikolaevich, Postgraduate of the Physics Department, Kazan State Power Engineering University, Kazan.

SPIN-code: 8738-8276

AuthorID (RSCI): 1219846

e-mail: maxim.snt@inbox.ru

MUKHAMETZYANOV Aydar Raisovich, Postgraduate of the Physics Department, Kazan State Power Engineering University, Kazan.

SPIN-code: 9915-7304

AuthorID (RSCI): 1219847

e-mail: aydar-999@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 01.12.2025; approved after reviewing 11.02.2026; accepted for publication 12.05.2026.

ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ: АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 12X18H10T

Н. Ю. Капалин✉, О. О. Бердников, Д. С. Реченко

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

✉ kapanick@mail.ru

В статье рассмотрены физические основы процессов лазерной обработки металлов, включая особенности взаимодействия лазерного излучения с материалом, механизмы поглощения энергии и закономерности теплового воздействия в зоне обработки. Целью исследования является определение рациональных режимов лазерной обработки нержавеющей стали 12X18H10T, обеспечивающих минимизацию зоны термического влияния и повышение качества обработанной поверхности.

Проведен анализ процессов плавления, испарения и формирования зоны термического влияния при лазерной резке металлических материалов. Представлен обзор основных типов промышленных лазеров, применяемых в современных технологиях лазерной обработки, включая газовые, твердотельные и волоконные лазерные источники, а также рассмотрены их технологические особенности, преимущества и области применения. Особое внимание уделено влиянию режимов обработки на качество поверхности и размеры изменённого слоя. Рассмотрены свойства и функции технологических газов, используемых при лазерной резке и наплавке металлов, а также их влияние на эффективность удаления расплава и снижение термических дефектов.

В экспериментальной части выполнены исследования лазерной резки стали 12X18H10T толщиной 0,8 мм на установке DMG MORI Lasertec 20 при варьировании мощности лазерного излучения. Проведен анализ структуры изменённого слоя и характера теплового воздействия на материал. Установлены оптимальные параметры обработки, обеспечивающие минимальную толщину зоны термического влияния и стабильное формирование реза. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность применения лазерных технологий при обработке нержавеющей стали и возможность их использования для высокоточного изготовления тонколистовых конструкций авиационного и машиностроительного назначения.

Ключевые слова: лазерная обработка, физика процесса, зона термического влияния, технологические газы, сталь 12X18H10T, эксперимент

Для цитирования: Капалин Н. Ю., Бердников О. О., Реченко Д. С. Физика и технология лазерной обработки металлов: анализ режимов обработки стали 12X18H10T. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 56–63. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-56-63>. EDN: LPWJWU.



© Капалин Н. Ю., Бердников О. О., Реченко Д. С., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PHYSICS AND TECHNOLOGY OF THE LASER METAL PROCESSING: ANALYSIS OF PROCESSING MODES OF THE 12X18H10T STEEL

N. Yu. Kapalin✉, O. O. Berdnikov, D. S. Rechenko

Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

✉ kapanick@mail.ru

The article discusses the physical foundations of laser metalworking processes, including the features of the interaction of laser radiation with the material, the mechanisms of energy absorption and the patterns of thermal effects in the processing area. The aim of the research is to determine the rational modes of laser treatment of the 12X18H10T steel, minimizing the zone of thermal influence and improving the quality of the treated surface.

The authors conduct the analysis of the processes of melting, evaporation and formation of the thermal influence zone during laser cutting of metal materials. Moreover, the authors present an overview of the main types of industrial lasers used in modern laser processing technologies, including gas, solid-state and fiber laser sources, as well as their technological features, advantages and applications. Special attention is made on the effect of processing modes on the surface quality and the size of the modified layer. The article considers the properties and functions of process gases used in laser cutting and metal plating, as well as their effect on melt removal efficiency and reduction of thermal defects.

The experimental part demonstrates the laser cutting of the 12X18H10T steel with a thickness of 0.8 mm on a DMG MORI Lasertec 20 installation with varying laser radiation power. The article analyses the structure of the modified layer and the nature of the thermal effect on the material and also establishes optimal processing parameters to ensure the minimum thickness of the heat-affected zone and stable cut formation. The results confirm the high efficiency of the laser technologies usage in the processing of stainless steels and the possibility to use them for high-precision manufacturing of thin-sheet structures for aviation and machine-building purposes.

Keywords: laser processing, process physics, thermal influence zone, process gases, 12X18H10T steel, experiment

For citation: Kapalin N. Yu., Berdnikov O. O., Rechenko D. S. Physics and technology of the laser metal processing: Analysis of processing modes of the 12X18H10T steel. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):56–63. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-56-63>. EDN: LPWJWU. (In Russ.).



© Kapalin N. Yu., Berdnikov O. O., Rechenko D. S., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Современные технологии обработки металлов стремительно развиваются в направлении повышения точности, скорости и качества готовых изделий. Среди инновационных методов особое место занимает лазерная обработка, основанная на использовании сфокусированного пучка когерентного излучения высокой плотности энергии [1, 2]. Благодаря уникальному сочетанию термического и оптического воздействия, лазерные технологии позволяют осуществлять резку, сварку, термообработку, легирование и поверхностное упрочнение материалов с минимальными искажениями структуры и геометрии изделия [3, 4].

Физика процесса лазерной обработки основана на поглощении электромагнитного излучения материалом и преобразовании световой энергии в тепловую. При этом в зависимости от параметров излучения — длины волны, плотности мощности, длительности импульса и скорости сканирования — могут реализовываться различные режимы взаимодействия: плавление, испарение, термическое упрочнение или структурная модификация поверхности [5, 6].

Существенное влияние на эффективность лазерного воздействия оказывают тип лазера и параметры обработки, а также вид технологического газа, обеспечивающего защиту зоны обработки и удаление продуктов плавления [7]. Современные установки для лазерной обработки позволяют точно регулировать эти параметры, что делает возможной адаптацию технологии под конкретные свойства материала.

Особый интерес представляет применение лазерных технологий для обработки нержавеющей стали, таких как сталь 12X18H10T. Исследование особенностей взаимодействия лазерного излучения

с данной сталью позволяет оптимизировать режимы обработки, улучшить механические характеристики и повысить долговечность изделий [8].

Физика процесса лазерной обработки

Главная особенность, определяющая работу лазерного излучения, — это локальное воздействие теплового источника на материал и высокие скорости его нагрева и охлаждения. Лазерная термообработка, сварка и резка осуществляются соответственно при средней мощности излучения более 1 кВт; более 2 кВт и в диапазоне 0,5...5,0 кВт. При этом существуют и другие параметры, характеризующие излучение, такие как угловая расходимость, длина передачи излучения, допустимая нестабильность полной мощности и угловой расходимости, поляризация излучения и т. д. [9].

Требуемый результат и свойства поверхности при лазерной обработке получают путем создания определенного термического цикла с оптимальными технологическими параметрами: максимальной температурой нагрева; скоростью нагрева и охлаждения; временем выдержки металла при температуре аустенитизации и др. Тепловое состояние металла в процессе обработки является ключевым для прогнозирования геометрии зоны термического воздействия, фазовых и структурных превращений, конечного напряженно-деформированного состояния, в совокупности определяющих свойства поверхностного слоя, поэтому исследование лазерной обработки напрямую связано с методами исследования тепловых процессов¹ [10]. При этом обработка металла лазерным излучением ведется с учетом частичного поглощения излучения, характеризующего эффективным коэффициентом поглощения $A_{эф}$, определяемого отношением части энергии лазерного излучения, поглощенной металлом в про-

¹ Елисеев А. А. Промышленная резка металла с помощью лазера. Основы и перспективы развития // Молодежь и системная модернизация страны: сборник научных статей 9-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. Курск, 2025. С. 335–337. EDN: BBTMCX.

цессе обработки, к общей энергии лазерного излучения [11].

Эффективный коэффициент поглощения $A_{\text{эф}}$, фактически определяющий КПД лазерной обработки, зависит от параметров излучения (длина волны излучения, плотность мощности лазерного излучения, направленность излучения к поверхности, угол сходимости лазерных лучей и т. д.), обрабатываемого материала (физико-механические свойства, структура, химический состав и т. д.), геометрии и формы обрабатываемого изделия, применяемого газа и др. Эффективный коэффициент поглощения $A_{\text{эф}}$ распределяется от 5 до 90 % в зависимости от всех факторов, а фактическое значение определяется экспериментально методом калориметрии. При этом главным фактором является тип лазера. На сегодняшний день в промышленности применяются различные типы лазеров, наиболее распространёнными из которых являются:

1. CO_2 лазеры. Это газовые лазеры, в которых рабочей средой является смесь углекислого газа (CO_2), азота и гелия. Эти лазеры генерируют излучение в инфракрасной области спектра с длиной волны около 10,6 мкм.

2. Волоконные лазеры. Используют оптическое волокно, легированное редкоземельными ионами (например, иттербием), в качестве активной среды. Возбуждение происходит за счет накачки светом от диодов, вводимым в волокно. Излучение усиливается в волокне благодаря эффекту усиления при прохождении через легированную среду [12].

3. Nd:YAG лазеры. Твердотельные лазеры с активной средой из иттриевого алюминат-иттербиевого граната ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), легированной ионами неодима. Возбуждение Nd:YAG лазера осуществляется с помощью ламп или диодных лазеров, приводя к генерации излучения на длине волны 1,064 мкм. Резонатор усиливает когерентный световой пучок.

4. Дисковый лазер. Разновидность твердотельного лазера, в котором активная среда выполнена в виде тонкого диска, обычно из Yb:YAG. Излучение накачивается через диск, который эффективно охлаждается с обратной стороны. Это позволяет добиваться высокой мощности и хорошего теплоотвода [13].

5. Экимерные лазеры. Газовые лазеры, использующие возбужденные молекулярные комплексы (экимерные молекулы) для генерации ультрафиолетового излучения (например, XeCl , KrF). Возбуждение газа происходит посредством электрического разряда, после чего молекулы переходят в возбужденное состояние, которое существует только временно, излучая коротковолновое УФ-излучение [14].

Каждый тип лазера имеет свои уникальные особенности, что определяет его область применения. CO_2 лазеры — лидеры в промышленной резке толстых материалов, волоконные лазеры — в прецизионной обработке, Nd:YAG — универсальные решения для медицины и промышленности, дисковые — мощные компактные источники, а экимерные — незаменимы в микрообработке и медицине.

Основные этапы и параметры лазерной обработки

Лазерная обработка металлов — сложный физико-технический процесс, основанный на локальном воздействии сфокусированного лазерного излучения высокой плотности мощности на поверхность металла. Рассмотрим основные этапы и параметры,

определяющие характер и эффективность обработки.

1. Поглощение лазерного излучения. Металл частично поглощает энергию лазерного пучка, преобразуя её в тепловую. Эффективный коэффициент поглощения $A_{\text{эф}}$ зависит от материала, длины волны лазера, состояния поверхности. Например, у алюминиевых сплавов коэффициент поглощения ниже, чем у стали, что требует коррекции параметров лазера.

2. Нагрев и фазовые переходы. Поглощённая энергия вызывает рост температуры в зоне обработки. В зависимости от плотности энергии и времени воздействия, металл проходит через следующие фазы:

— *нагрев без фазовых превращений (структурные изменения твёрдой фазы)*. При температурах ниже критических точек фазовых превращений (для сталей ориентировочно до области A_{c1}) происходят процессы восстановления, снятия остаточных напряжений и рекристаллизации ($\sim 400 - 700^\circ\text{C}$ для сталей). На этом этапе изменяется дислокационная структура и размер зерна без плавления и без изменения фазового состава. Такой режим используется при лазерном отпуске, локальной термообработке и стабилизации структуры материала;

— *нагрев с фазовыми превращениями (термическое упрочнение)*. При превышении критических температур фазовых превращений ($A_{c1} - A_{c3}$ для сталей) происходит аустенитизация материала, что является основой лазерной закалки и других видов лазерной термообработки. Последующее высокоскоростное охлаждение приводит к формированию мартенситной или бейнитной структуры и упрочнению поверхностного слоя;

— *плавление*. Температура плавления для различных металлов и сплавов существенно различается: для сталей — около 1450°C , для алюминиевых сплавов — около 660°C , для медных сплавов — в широком диапазоне примерно $950 - 1083^\circ\text{C}$ в зависимости от химического состава (латуни, бронзы и др.). Плавление обеспечивает формирование расплавленной зоны при лазерной резке, сварке и наплавке;

— *испарение (абляция)*. При температурах, значительно превышающих температуру плавления (порядка $3000 - 4000^\circ\text{C}$), происходит удаление материала в виде парообразных продуктов, что характерно для лазерного сверления и микромаркировки.

3. Охлаждение и затвердевание. Быстрое охлаждение (до $10^4 - 10^6$ К/с) приводит к быстрому затвердеванию металла, что уменьшает зоны термического повреждения и деформаций.

Режимы и факторы, влияющие на размеры зоны лазерного воздействия

Помимо основных параметров, таких как мощность лазера, скорость перемещения луча, фокусировка луча (диаметр пятна), длина волны лазера, существует еще один параметр — это режим работы лазера, который также определяет зону лазерного воздействия (ЗЛВ). Основные режимы:

1. Непрерывный режим (Continuous Wave, CW). Он характеризуется стабильным и непрерывным излучением лазерного света без перерывов во времени. В этом режиме мощность лазерного излучения сохраняется постоянной в течение всего времени работы лазера. Источником такого излучения может служить резонатор с постоянным уровнем возбуждения активной среды, обеспечи-

Таблица 1. Критические параметры веществ
Table 1. Critical parameters of substances

Газ	Критические параметры			Основное назначение	Обрабатываемый материал
	T_K , К	P_K , МПа	V_K , 10^6 , м ³ /моль		
Азот (N ₂)	126,25	3,400	90,1	Чистый рез без окислов	Нержавеющая сталь
Кислород (O ₂)	154,58	5,143	78	Повышение скорости реза	Углеродистая сталь
Аргон (Ar)	150,65	4,86	74,67	Защита от химического взаимодействия	Титан
Гелий (He)	5,19	0,227	57,4	Предотвращает окисление и загрязнение зоны обработки	Нержавеющая сталь
Воздух (Сжатый воздух)	132,5	3,77	29,40	Защита оптических элементов	Углеродистые (конструкционные) стали
Смесь N ₂ / Ar	138,5	4,12	82,38	Предотвращение окисления	Титан

Таблица 2. Режимы лазерной резки стали 12X18H10T (толщина 0,8 мм)
Table 2. Laser cutting modes of the 12X18H10T steel (thickness of 0.8 mm)

№ опыта	Мощность, Вт	Частота, Гц	Давление газа, бар	Фокус, мм	Скорость, мм/мин	Изменённый слой, мкм
1	1000	500	9	– 1	210	8...42
2	1100	500	9	– 1	210	7...50
3	1200	500	9	– 1	210	6...53
4	1300	500	9	– 1	210	5...35
5	1400	500	9	– 1	210	7...69
6	1500	500	9	– 1	210	8...28

вающим поддержание лазерного процесса без прерываний.

2. Импульсный режим (Pulse Wave, PW). Он предполагает генерацию лазерного излучения в форме отдельных импульсов с определённой длительностью, энергией и частотой повторения. В период между импульсами интенсивность излучения стремится к нулю. Такой режим позволяет достичь чрезвычайно высоких пиковых мощностей, что невозможно в CW-режиме.

3. Квазинепрерывный режим (Quasi Continuous Wave, QCW). Представляет собой промежуточную форму работы лазера, при которой излучение формируется серией импульсов с длительностью, достаточной для создания практического непрерывного светового потока на временных интервалах. Временные промежутки между импульсами достаточно малы, чтобы усреднённое излучение воспринималось как почти непрерывное.

Оптимальный выбор режима работы и параметров лазера позволяет добиться необходимого результата — от поверхностного упрочнения до глубокого реза с минимальными термическими деформациями. Контроль температуры и фазовых переходов является ключевым для повышения качества и стабильности лазерной обработки, поэтому в процессе обработки применяют газы, зачастую имеющие доминирующее влияние на конечный результат.

В промышленности широко применяют лазерную технику, имеющую подвод газового потока в зону обработки, при этом применяют различные газы.

Выбор газа в зависимости от типа материала

Выбор технологического газа зависит от химического состава обрабатываемого металла и требований к качеству поверхности. Наиболее применяемые сочетания газов приведены в табл. 1.

Критическая температура (T_K): температура, выше которой газ не может быть сжижен ни при каком давлении. Критическое давление (P_K): минимальное давление, необходимое для сжижения газа при достижении критической температуры. Критический объем (V_K): объем, который занимает один моль вещества при критических параметрах.

Применение технологических газов при лазерной резке металлов является критическим фактором, определяющим качество, производительность и экономичность процесса. Правильный выбор типа газа и параметров его подачи позволяет оптимизировать тепловое воздействие, минимизировать дефекты и повысить ресурс оборудования [15].

Проведение экспериментов

Целью настоящего исследования является определение влияния мощности лазерного излучения на толщину изменённого слоя при резке листового материала 12X18H10T толщиной 0,8 мм на установке DMG MORI Lasertec 20, оснащённой волоконным лазером непрерывного действия (CW-режим).

Методика эксперимента. Образцы из коррозионно-стойкой стали 12X18H10T толщиной 0,8 мм подвергались резке на установке DMG MORI Lasertec 20 для определения изменённого слоя и визуального исследования реза. Резка выполнялась в среде технологического газа — азота (N₂),

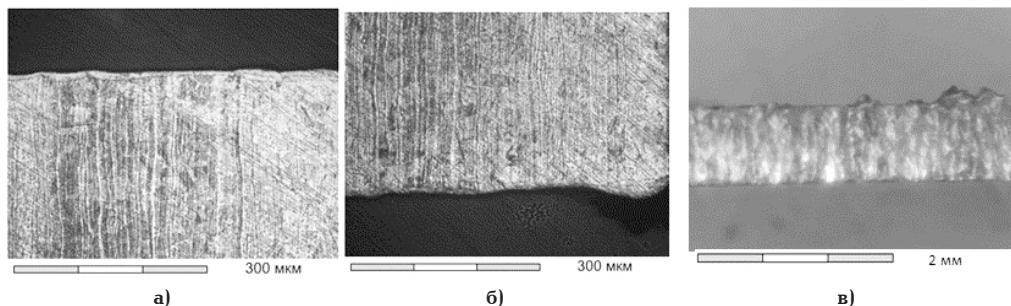


Рис. 1. Обработанная поверхность стали 12X18H10T, опыт № 1:
а), б) микроструктура модифицированного слоя; в) поверхность после реза
Fig. 1. Processed surface of the 12X18H10T steel, experiment no. 1:
а), б) microstructure of the modified layer; в) surface after cutting

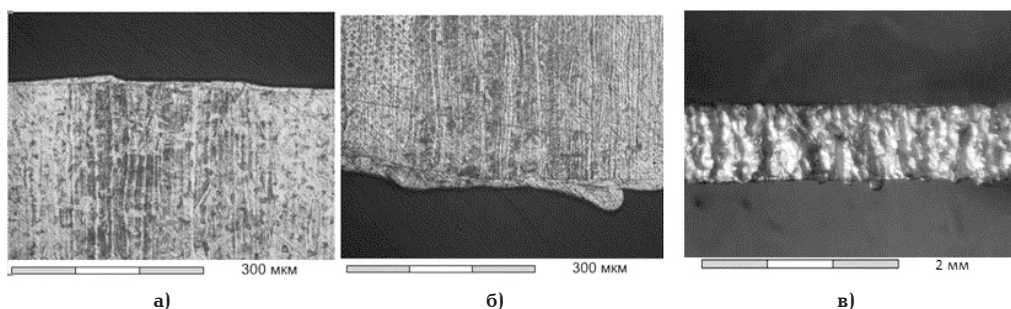


Рис. 2. Обработанная поверхность стали 12X18H10T, опыт № 2:
а), б) микроструктура модифицированного слоя; в) поверхность после реза
Fig. 2. Processed surface of the 12X18H10T steel, experiment no. 2:
а), б) microstructure of the modified layer; в) surface after cutting

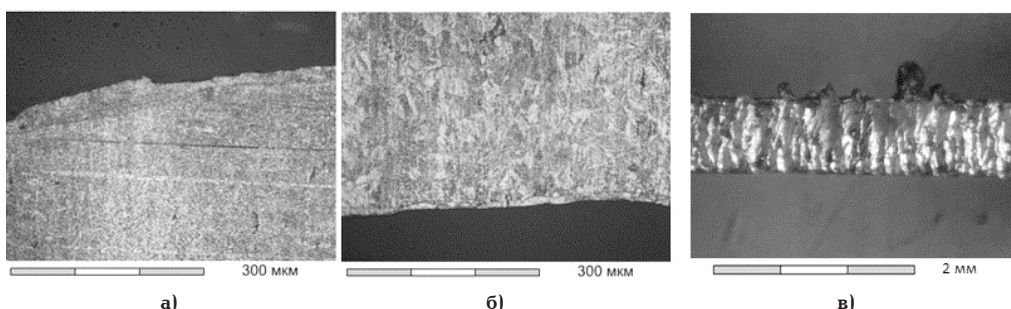


Рис. 3. Обработанная поверхность стали 12X18H10T, опыт № 3:
а), б) микроструктура модифицированного слоя; в) поверхность после реза
Fig. 3. Processed surface of the 12X18H10T steel, experiment no. 3:
а), б) microstructure of the modified layer; в) surface after cutting

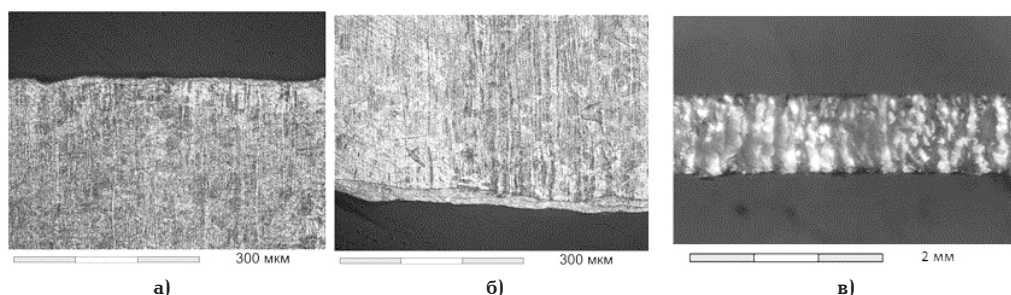


Рис. 4. Обработанная поверхность стали 12X18H10T, опыт № 4:
а), б) микроструктура модифицированного слоя; в) поверхность после реза
Fig. 4. Processed surface of the 12X18H10T steel, experiment no. 4:
а), б) microstructure of the modified layer; в) surface after cutting

применяемого для предотвращения окисления кромки и обеспечения высокого качества реза. Во всех экспериментах использовались одинаковые условия обработки, за исключением мощности лазерного излучения, которая варьировалась в диапазоне от 1000 до 1500 Вт.

Основные параметры эксперимента приведены в табл. 2.

После резки каждый образец подвергался металлографическому анализу с использованием оптического микроскопа при увеличении $\times 300$, $\times 100$. Изменённый слой определяли, как зону с видимы-

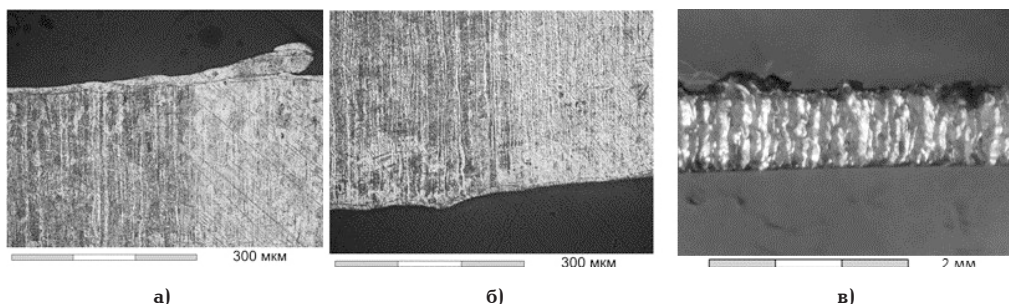


Рис. 5. Обработанная поверхность стали 12X18H10T, опыт № 5:
а), б) микроструктура модифицированного слоя; в) поверхность после реза
Fig. 5. Processed surface of the 12X18H10T steel, experiment no. 5:
а), б) microstructure of the modified layer; в) surface after cutting

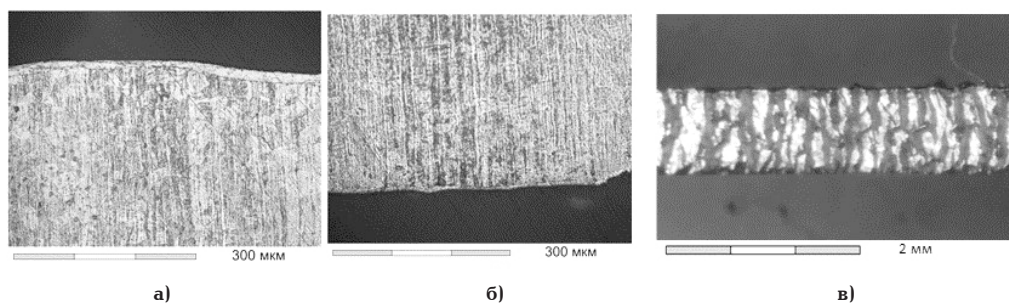


Рис. 6. Обработанная поверхность стали 12X18H10T, опыт № 6:
а), б) микроструктура модифицированного слоя; в) поверхность после реза
Fig. 6. Processed surface of the 12X18H10T steel, experiment no. 6:
а), б) microstructure of the modified layer; в) surface after cutting

ми признаками структурной неоднородности и рекристаллизации по границе реза.

Фотографии обработанной поверхности (рис. 1 – 6) демонстрируют морфологические особенности изменённой зоны при различных мощностях излучения.

Результаты

Анализ микроструктуры показал, что при увеличении мощности лазера от 1000 до 1200 Вт наблюдается постепенное утолщение изменённого слоя (до 50–53 мкм), что связано с возросшим тепловым воздействием и увеличением зоны термического влияния. При мощности 1300 Вт толщина изменённого слоя снижается до 35 мкм, что может быть обусловлено изменением режима плавления и стабилизацией фронта реза.

Наиболее неравномерная структура наблюдается при мощности 1400 Вт: толщина изменённого слоя достигала 69 мкм, а на микрошлифах фиксировались участки перегрева и микротрещины по границе расплава (рис. 5). При дальнейшем повышении мощности до 1500 Вт формировалась более компактная зона с толщиной 8–28 мкм и признаками быстрой кристаллизации расплава с образованием мелкодендритной литой структуры аустенита, характерной для высоких скоростей охлаждения при лазерной обработке (рис. 6). Таким образом, влияние мощности лазера на толщину изменённого слоя носит нелинейный характер. Рациональной мощностью для рассматриваемых условий можно считать диапазон 1200–1300 Вт, при котором достигается минимальная ширина зоны термического влияния и невысокие значения неровности кромки реза (например, максимальная высота профиля поверхности не превышает 5–7 мкм), что позволяет объективно оценивать качество реза. На рис. 7

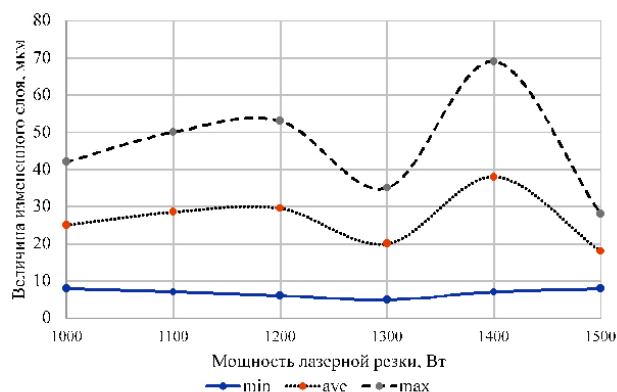


Рис. 7. График зависимости изменённого слоя от мощности лазерной резки
Fig. 7. Diagram of the dependence of the modified layer on the laser cutting power

представлен график зависимости изменённого слоя от мощности лазерной резки. Полученные данные согласуются с литературными источниками, указывающими на наличие оптимальной мощности лазера для минимизации микроструктурных дефектов и шероховатости поверхности.

В результате проведённых экспериментов установлено следующее:

1. Толщина изменённого слоя при лазерной резке стали 12X18H10T существенно зависит от мощности излучения.
2. Минимальная ширина зоны термического влияния (5–35 мкм) достигается при мощности 1300 Вт.
3. При повышении мощности свыше 1400 Вт наблюдается перегрев материала и увеличение глубины изменённого слоя до 69 мкм.

4. Оптимальные параметры резки для листа толщиной 0,8 мм: мощность 1200–1300 Вт, частота 500 Гц, давление газа 9 бар, фокус – 1 мм, скорость 210 мм/мин.

Заключение

В ходе проведённого исследования рассмотрены физические основы процессов лазерной обработки металлов, включая механизмы взаимодействия лазерного излучения с поверхностью материала и закономерности теплового распределения в зоне воздействия. Установлено, что характер изменения структуры и свойств металла определяется совокупностью основных параметров резки — мощности и скорости перемещения луча.

Проведённые эксперименты по лазерной резке нержавеющей стали 12X18H10T толщиной 0,8 мм на установке DMG MORI Lasertec 20 позволили установить влияние мощности лазерного излучения на формирование изменённого слоя в зоне термического влияния.

Анализ результатов показал, что увеличение мощности от 1000 до 1200 Вт приводит к росту толщины изменённого слоя вследствие усиления теплового воздействия на материал. При дальнейшем увеличении мощности до 1300 Вт наблюдается стабилизация процесса и уменьшение толщины зоны термического влияния до 5–35 мкм, что свидетельствует о более эффективном удалении расплава и оптимальном распределении тепловой энергии.

При мощностях выше 1300 Вт (1400–1500 Вт) отмечается неравномерное формирование структуры изменённого слоя, сопровождающееся колебаниями его толщины в диапазоне 7–69 мкм. Это указывает на появление локальных перегревов и микродефектов, связанных с нестабильностью теплового баланса в зоне обработки.

Таким образом, установлено, что оптимальные условия лазерной резки исследуемого материала обеспечиваются при мощности 1200–1300 Вт, частоте 500 Гц, давлении газа 9 бар, фокусном расстоянии – 1 мм и скорости 210 мм/мин. В этих режимах достигается минимальная толщина изменённого слоя, стабильная форма реза и отсутствие термических дефектов.

Результаты исследования могут быть использованы для выбора рациональных режимов лазерной обработки нержавеющей сталей, а также при разработке технологических карт для высокоточной резки тонколистовых конструкций.

Список источников / References

1. Капалин Н. Ю., Бердников О. О., Реченко Д. С., Лопатин Б. А. Влияние скорости перемещения лазерной режущей головки при обработке сплава 12X18H10T на качество получаемой поверхности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2026. Т. 26, № 1. С. 78–86. <https://doi.org/10.14529/engin260107>. EDN: GNTOXС.

Kapalin N. Yu., Berdnikov O. O., Rechenko D. S., Lopatin B. A. The effect of the speed of movement of the laser cutting head during processing of alloy 12X18H10T on the quality of the resulting surface. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*. 2026;26(1):78–86. <https://doi.org/10.14529/engin260107>. EDN: GNTOXС. (In Russ.).

2. Минаев И. В. Влияние режимов лазерного микроструктурирования на концентрацию углерода и уровень остаточных напряжений в поверхностном слое изделий из углеродистых сталей // Известия Юго-Западного государствен-

ного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 39–50. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-39-50>. EDN: KWYMUК.

Minaev I. V. The effect of laser microstructuring modes on Carbon concentration and the level of residual stresses in the surface layer of carbon steel products. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2025;15(1):39–50. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-39-50>. EDN: KWYMUК. (In Russ.).

3. Гурьев В. А., Гребнев Ю. В., Жаркова В. Ф., Гребнев Д. Ю. Лазерная обработка отливок из серого чугуна // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Металлургия». 2025. № 7 (302). С. 84–87. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-7-302-84-87>. EDN: TBVCDW.

Guriev V. A., Grebnev Yu. V., Zharkova V. F., Grebnev D. Yu. Laser processing of castings from grey cast iron. *Izvestia Volgograd State Technical University. Series "Metallurgy"*. 2025;7(302):84–87. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-7-302-84-87>. EDN: TBVCDW. (In Russ.).

4. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А. Лазерная прецизионная микрообработка материалов. Москва: Физматлит, 2017. 416 с.

Grigoryants A. G., Kazaryan M. A., Lyabin N. A. *Lazernaya pretsizionnaya mikroobrabotka materialov*. Moscow, 2017. 416 p. (In Russ.).

5. Ретюхин Г., Ланин В. Л., Школык С. Лазерная размерная обработка материалов подложек МЭМС // Технологии в электронной промышленности. 2014. № 6 (74). С. 90–95. EDN: SMHPJN.

Retyukhin G., Lanin V. L., Shkolyk S. Laser dimensional processing of MEMS substrate materials. *Tekhnologii v Elektronnoy Promyshlennosti*. 2014;6(74):90–95. EDN: SMHPJN. (In Russ.).

6. Закалюкина Л. А., Баннов В. Я. Виды и параметры процесса лазерной резки // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2016. № 19. С. 163–167. EDN: VTZOGT.

Zakalyukina L. A., Bannov V. Ya. Vidy i parametry protsessa lazernoy rezki. *Novyye Informatsionnyye Tekhnologii v Avtomatizirovannykh Sistemakh*. 2016;19:163–167. EDN: VTZOGT. (In Russ.).

7. Steen W. M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. Springer, 2010. 558 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5>. ISBN 978-1-84996-061-8. EDN: SSJTHD.

8. Alsaadawy M., Dewidar M., Said A. [et al.]. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;130(4):1039–1074. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12768-1>.

9. Кузнецов М., Земляков Е., Бабкин К. Обзор лазерных технологических головок для реализации промышленных лазерных технологий обработки металлических материалов // Фотоника. 2016. № 6(60). С. 14–35. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.60.6.14.33>. EDN: XEUECL.

Kuznetsov M., Zemlyakov E., Babkin K. Review of laser technological heads for implementation of industrial laser technologies of metal material working. *Photonics*. 2016;6(60):14–35. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.60.6.14.33>. EDN: XEUECL. (In Russ.).

10. Барчуков Д. А., Смолякова И. А., Афанасьева Л. Е. Влияние технологических параметров лазерной резки на размер зоны лазерного воздействия // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2024. № 4(24). С. 22–28. <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2024-4-22-28>. EDN: GPJLBT.

Barchukov D. A., Smolyakova I. A., Afanasieva L. E. Influence of technological parameters of laser cutting on the size of the laser impact zone. *Vestnik of Tver State Technical University. Series "Technical Science"*. 2024;4(24):22–28. <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2024-4-22-28>. EDN: GPJLBT. (In Russ.).

11. Шапарев А. В., Савин И. А. Анализ влияния различных факторов на технологию лазерной резки волоконными лазерами // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2025. Т. 81, № 2. С. 52–57. EDN: DZMNIE.

Shaparev A. V., Savin I. A. Analysis of the impact of various factors on laser cutting technology with fiber lasers. *Bulletin of Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev*. 2025;81(2):52–57. EDN: DZMNIE. (In Russ.).

12. Игрунова О. М., Маляренко Р. О. Сегментирование рынка лазерных станков в части российской клиентской базы компании Han's Laser // Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2023. № 1(37). С. 47–59. <https://doi.org/10.24151/2409-1073-2023-1-47-59>. EDN: WEVNSZ.

Igrunova O. M., Malyarenko R. O. Laser machine tool market segmentation in a part of Russian customer base of Han's Laser company. *Economic and Social Research*. 2023;1(37):47–59. <https://doi.org/10.24151/2409-1073-2023-1-47-59>. EDN: WEVNSZ. (In Russ.).

13. Козловский В. И., Коростелин Ю. В., Охотников О. Г. [и др.]. Непрерывный лазер на кристалле $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ с накачкой полупроводниковым дисковым лазером // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. № 6. С. 30–36. EDN: OYSRCT.

Kozlovskii V. I., Korostelin Y. V., Podmarkov Y. P. [et al.]. CW $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ laser pumped by semiconductor disk laser. *Kratkiye Soobshcheniya po Fizike FIAN*. 2012;6:30–36. EDN: OYSRCT. (In Russ.).

14. Копылова Т. Н., Майер Г. В. Разработка и создание мощных лазеров на красителях с накачкой эксимерными лазерами // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6, № 6. С. 704–711. EDN: SGCQYP.

Kopylova T. N., Mayyer G. V. Razrabotka i sozdaniye moshchnykh lazerov na krasitelyakh s nakachkoy eksimernymi lazerami. *Optika Atmosfery i Okeana*. 1993;6(6):704–711. EDN: SGCQYP. (In Russ.).

15. Жуков А. А., Власов А. М. Влияние вспомогательных газов при лазерной резке, их преимущества и недостатки // Современные материалы, техника и технологии. 2024. № 3(54). С. 38–43. <https://doi.org/10.47581/2024.SMTT-3/Gukov-Alex-01>. EDN: KAOBSL.

Zhukov A. A., Vlasov A. M. Influence of auxiliary gases in laser cutting, their advantages and disadvantages. *Modern Materials, Equipment and Technologies*. 2024;3(54):38–43. <https://doi.org/10.47581/2024.SMTT-3/Gukov-Alex-01>. EDN: KAOBSL. (In Russ.).

Вклад авторов:

Н. Ю. Капалин. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, проведение экспериментальных исследований, оценка результатов, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

О. О. Бердников. Проведение обзора научно-технической литературы, разработка и анализ технологических решений, участие в обработке и интерпретации результатов исследования.

Д. С. Реченко. Поиск способов интеграции разработанных технологических решений в существующую производственную систему, анализ результатов экспериментов и участие в подготовке материалов статьи.

Authors' contribution:

Nikolay Yu. Kapalin. Setting research aim and objectives, analysing the status of the issue, conducting experimental research, evaluating results, presenting conclusions and preparing the text of the article.

Oleg O. Berdnikov. Conducting a review of scientific and technical literature, developing and analysing

technological solutions, participating in the processing and interpretation of research results.

Denis S. Rechenko. Searching ways to integrate the developed technological solutions into the existing production system, analysing experimental results and preparing of the materials of the article.

Информация об авторах:

КАПАЛИН Николай Юрьевич, аспирант кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 9723-7716

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5985-9296>

e-mail: kapanick@mail.ru

БЕРДНИКОВ Олег Олегович, аспирант кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ, г. Омск.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0201-2116>

e-mail: oleg-berdnikow@mail.ru

РЕЧЕНКО Денис Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8260-8320

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6776-6452>

ResearcherID: D-5096-2014

AuthorID (SCOPUS): 25227868500

e-mail: rechenko-denis@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 20.11.2025; одобрена после рецензирования 04.03.2026; принята к публикации 18.05.2026.

Information about the authors:

KAPALIN Nikolay Yur'yevich, Postgraduate of the Metal-Cutting Machines and Tools Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 9723-7716

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5985-9296>

e-mail: kapanick@mail.ru

BERDNIKOV Oleg Olegovich, Postgraduate of the Metal-Cutting Machines and Tools Department, Omsk State Technical University, Omsk.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0201-2116>

e-mail: oleg-berdnikow@mail.ru

RECHENKO Denis Sergeyevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Metal-Cutting Machines and Tools Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 8260-8320

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6776-6452>

ResearcherID: D-5096-2014

AuthorID (SCOPUS): 25227868500

e-mail: rechenko-denis@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 20.11.2025; approved after reviewing 04.03.2026; accepted for publication 18.05.2026.

МЕТОД ПРЕЦЕДЕНТНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ЧАСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

М. Ф. Моргунов 

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

 Mihailremix@yandex.ru

Неопределённость исходных данных и ограниченное число прецедентов существенно затрудняют прогнозирование свойств новых составных частей авиационной техники на ранних стадиях разработки. Цель работы — сформировать метод прецедентного прогнозирования, позволяющий оценивать свойства проектируемой части изделия в условиях дефицита априорной информации и при нелинейной зависимости между условиями проектирования и целевыми параметрами.

Метод основан на представлении проектной ситуации в виде вектора условий (X) и вектора прогнозируемых свойств (Y), а также на использовании протокола наблюдений, сформированного по ранее разработанным аналогам. Для случая малого числа прецедентов предложена процедура многомерной линейной экстраполяции, основанная на построении подпространств условий и решений и на проектировании новой проектной ситуации на пространство известных аналогов. Для случая значительной выборки и нелинейной связи между входными и выходными параметрами предложена нейросетевая модель на основе самоорганизующейся карты Кохонена.

В работе формализованы условия применения обеих процедур, заданы их математические модели и определены принципы выбора структуры прогнозной сети. Практическая значимость результатов состоит в возможности использовать накопленные проектные прецеденты для предварительной оценки свойств изделия, сокращения числа проектных итераций и повышения обоснованности принимаемых конструкторских решений.

Ключевые слова: оптимизация, проектирование изделий, авиационная техника, многомерная линейная экстраполяция, многослойная нейронная сеть, аппроксимация, конструкторско-технологическая характеристика

Для цитирования: Моргунов М. Ф. Метод прецедентного прогнозирования свойств частей изделий авиационной техники. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 64–70. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-64-70>. EDN: FDTKHA.



© Моргунов М. Ф., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PRECEDENT-BASED METHOD FOR PREDICTING THE FEATURES OF AVIATION COMPONENTS

М. F. Morgunov 

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Volokolamskoye Rd., 4, Moscow, 125993, Russia

 Mihailremix@yandex.ru

The uncertainty of the initial data and the limited number of use cases significantly complicate the prediction of the features of new components of aviation technology in the early stages of development. The aim of the research is to form a method of precedent forecasting, which allow evaluating the features of the projected part of a product in conditions of a lack of a priori information and with a nonlinear relations between design conditions and target parameters.

The method is based on the representation of the design situation in the form of a vector of conditions (X) and a vector of predicted properties (Y), as well as on the use of an observation protocol based

on previously developed analogues. In case of a small number of precedents, the author proposes a multidimensional linear extrapolation procedure based on constructing subspaces of conditions and solutions and projecting a new design situation onto the space of known analogues. Moreover, in case of a significant sample and a nonlinear connection between input and output parameters, the author provides a neural network model based on a self-organizing Kohonen map.

The article formalizes the conditions for the application of both procedures, defines their mathematical models, and determines the principles for choosing the structure of the prognostic network. The practical significance of the results lies in the possibility of using accumulated design precedents for a preliminary assessment of product properties, reducing the number of design iterations and increasing the validity of design decisions.

Keywords: optimization, product design, aviation equipment, multidimensional linear extrapolation, multilayer neural network, approximation, design and technological features

For citation: Morgunov M. F. Precedent-based method for predicting the features of aviation components. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):64–70. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-64-70>. EDN: FDTKHA. (In Russ.).



© Morgunov M. F., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Современные изделия авиационной техники относятся к наиболее высокотехнологичным видам создаваемой техники. Стадия проектирования как начальная стадия жизненного цикла составной части и всего изделия авиационной техники строго регламентируется и по характеристикам создаваемых изделий, и по параметрам выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ [1–5].

В настоящее время значительный объем работ опирается на опыт и знания проектировщиков, которым необходимо тратить много ресурсов на проверку нормализации моделей составных частей. Метод эвристического (экспертного) прогнозирования характеристик новых изделий оказывается достаточно надежным инструментом исследователя, конструктора, потому что он основан на способности человека принимать решение в обстановке дефицита информации. Именно в этой обстановке и проходит процесс проектирования образцов новой авиационной техники (особенно на стадии предварительного проектирования) [2, 3]. Ручная манипуляция значительно увеличивает циклы переделки и доработки конструкции изделия в целом. В связи с этим оптимизация технологического процесса проектирования, направленная на уменьшение вспомогательных технологических операций, обусловленных подгонкой и устранением несовершенства характеристик вновь создаваемых составных частей изделий авиационной техники, является актуальной научно-технической задачей авиационной отрасли [4].

Одним из направлений такой оптимизации является автоматизация и повышение достоверности прогнозирования технических характеристик проектируемых составных частей в составе изделий авиационной техники [5, 6]. Это можно реализовать на основе многомерной линейной экстраполяции целевых характеристик и современных методов прогнозирования, основанных на технологиях машинного обучения [6–9]. Данные направления дополняют друг друга, так как нейросетевые модели требуют представительной базы прецедентов, а линейная экстраполяция может применяться на ранней стадии проектирования при ограниченном объеме исходных данных. Современные цифровые

двойники и киберфизические производственные модели рассматриваются как средство связывания проектных данных, расчетов и накопленного опыта [10, 11].

Многомерная линейная экстраполяция

Поскольку речь идет о проектировании достаточно сложных систем, экстремальные задачи системного проектирования приходится решать в многомерном пространстве, где достоверность экспертных оценок быстро снижается. Классические методы поиска оптимальных решений при высокой размерности пространства признаков, нелинейности связей и высокой вычислительной стоимости расчетных моделей становятся трудоемкими и требуют применения суррогатных моделей, метамоделирования и методов многодисциплинарной оптимизации [7–9; 12–16]. Иногда трудоемкость создания адекватных моделей (если позволяет априорная информация) соизмеримы с трудоемкостью создания реальных образцов техники. Между тем во многих конкретных технических и физических задачах проявляется сильная локальная зависимость математических решений от изменения исходных величин и проектных ситуаций.

Близость решений имеет большое значение и может быть эффективно использована при решении задач прогнозирования (пространственной экстраполяции) характеристик создаваемых изделий в условиях информационной недостаточности. Под задачей пространственной экстраполяции подразумевается нахождение значения функции в точке, лежащей вне отрезка наблюдения, по ее значениям внутри этого отрезка в пространстве технических, конструкторских, экономических показателей и эксплуатационных характеристик нового образца техники.

Пусть эффективность составной части изделия (далее по тексту — Изделия) авиационной техники определяется скалярной функцией двух векторных аргументов $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$:

$$Q = Q(\mathbf{X}, \mathbf{Y}), \quad (1)$$

где $\mathbf{Y} = (y_1, y_1, \dots, y_m)^T$ — вектор оптимизируемых параметров (целевых свойств) Изделия, $\mathbf{X} = (v_1, v_1, \dots, v_g, z_1, z_1, \dots, z_p, t)^T$ — вектор g условий применения,

l конструкторско-технологических характеристик (КТХ) и время эксплуатации Изделия.

Прототипы рассматриваемого Изделия характеризуются конечным набором векторных значений $\mathbf{X}^i, i = \overline{1, k}$, полученных в результате проведения КТХ протокола наблюдений первого порядка. Данные векторные показатели отражают полную и достоверную информацию о технических характеристиках исследуемых образцов $\mathbf{Y}^i, i = \overline{1, k}$.

Восстановление неизвестных параметров векторной функции F_1 осуществляется через анализ конечного множества реализаций k , где векторный аргумент $\mathbf{X}$ соотносится с соответствующими значениями вектора $\mathbf{Y}$ согласно протоколу наблюдений Ω_1 .

Векторное пространство $\{\mathbf{X}\}$ представляет совокупность исследуемых направлений $\mathbf{X}^i, i = \overline{1, k}$, при этом оптимизационное множество $\{\mathbf{Y}\}$ характеризует параметрические величины согласно установленным методологическим принципам применения рассматриваемого подхода:

$$k < n + 1, \quad (2)$$

где $n = g + l + 1$ — размер вектора $\mathbf{X}$.

Протокол наблюдений Ω_1 представляется матрицей размером $k \times (g + l + m)$ вида

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} v_1^1, v_2^1, \dots, v_g^1, & z_1^1, z_2^1, \dots, z_l^1, & t^1, & y_1^1, y_2^1, \dots, y_m^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_1^k, v_2^k, \dots, v_g^k, & z_1^k, z_2^k, \dots, z_l^k, & t^k, & y_1^k, y_2^k, \dots, y_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{V}^1 \mathbf{Z}^1] & \mathbf{Y}^1 \\ \dots & \dots \\ [\mathbf{V}^k \mathbf{Z}^k] & \mathbf{Y}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^1 & \mathbf{Y}^1 \\ \dots & \dots \\ \mathbf{X}^k & \mathbf{Y}^k \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Векторные подпространства (гиперплоскости) $\{\mathbf{X}\}$ и $\{\mathbf{Y}\}$ описываются следующими математическими соотношениями:

$$\begin{aligned} \{\mathbf{X}\} &= \mathbf{X}^1 + \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i (\mathbf{X}^{i+1} - \mathbf{X}^1); \\ \{\mathbf{Y}\} &= \mathbf{Y}^1 + \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i (\mathbf{Y}^{i+1} - \mathbf{Y}^1). \end{aligned} \quad (4)$$

Так как преобразование $\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y}$ линейно, то

$$\lambda_i = \mu_i, \quad i = \overline{1, k-1}. \quad (5)$$

Задача восстановления функции F_1 характеризуется множественностью возможных решений, причём неоднозначность полученных результатов эффективно устраняется посредством применения специальной функции Φ , определяющей степень подобия условий проектирования через сопоставление скалярных значений парам $\mathbf{X}^1$ и $\mathbf{X}^2$:

$$\Phi(\mathbf{X}, \mathbf{X}') = \|\mathbf{X} - \mathbf{X}'\|^2. \quad (6)$$

В евклидовом пространстве линейные подпространства $\{\mathbf{X}\}$ содержат ортогональные проекции $\mathbf{X}'$ векторов условий. Нахождение параметров λ_i , определяющих минимальное расстояние между вектором и его проекцией, осуществляется посредством решения системы линейных уравнений с учетом заданной функции дистанции:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_i} = 0, i = \overline{1, k-1} \quad (7)$$

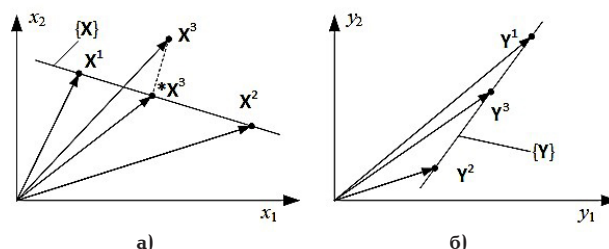


Рис. 1. Линейная экстраполяция по двум обучающим векторам: а) проекция новой проектной ситуации в пространстве условий $\mathbf{X}$; б) определение прогнозного вектора в пространстве свойств $\mathbf{Y}$

Fig. 1. Linear extrapolation based on two training vectors: а) projection of a new design situation in the condition space of $\mathbf{X}$; б) determination of the predicted vector in the condition space of $\mathbf{Y}$

В двумерной системе координат пространства проектных условий $\mathbf{X}$ (рис. 1а) рассматриваются две основные характеристики: угол обтекания потоком x_1 и параметр прочности x_2 . Двумерное пространство решений $\mathbf{Y}$ (рис. 1б) определяется безопасным ресурсом y_1 и долговечностью детали y_2 . Методика построения основывается на значениях векторов для существующих аналогов разрабатываемых изделий. Линейная взаимосвязь между известными ситуациями $\mathbf{X}^1$ и $\mathbf{X}^2$ формирует подпространство проектных ситуаций $\{\mathbf{X}'\}$, тогда как соединение точек $\mathbf{Y}^1$ и $\mathbf{Y}^2$ образует подпространство решений $\{\mathbf{Y}'\}$. Графическое представление данной зависимости отображено на рис. 1, где часть (а) демонстрирует пространство условий, а часть (б) — пространство решений.

При проецировании новой проектной ситуации $\mathbf{X}^3$ на подпространство ранее известных состояний $\mathbf{X}^1$ и $\mathbf{X}^2$ формируется перпендикулярная проекция $\mathbf{X}^3$, определяющая пропорциональное деление базового отрезка. Применение полученного коэффициента пропорциональности к сегменту $\mathbf{Y}^1 - \mathbf{Y}^2$ в пространстве решений $\{\mathbf{Y}'\}$ позволяет математически обоснованно установить координаты проектного решения $\mathbf{Y}^3$, соответствующего исходной ситуации $\mathbf{X}^3$.

Нейросетевая нелинейная экстраполяция

Используемые в качестве модели экстраполяции нейронные сети (НС) с самоорганизацией на основе конкуренции представляют собой класс искусственных НС, настраиваемых в соответствии с парадигмой соревновательного самообучения [10, 11].

Для НС такой архитектуры характерны два вида определяющих функций (рис. 2) [11, 12]:

1) функция расстояния между входным вектором $\mathbf{X}^k$ и вектором весовых коэффициентов $\mathbf{W}_i$ каждым i -м нейроном слоя Кохонена;

2) функция влияния, описывающая латеральное торможение: чем меньше значение функции расстояния, для которого функция 1 принимает минимальное значение, тем сильнее корректируются веса соседних нейронов слоя Кохонена.

Вместо аппроксимации функции $f: A^n \subset R^{m=3} \rightarrow R^4$, производящей отображение подмножества A n -мерного евклидова пространства в m -мерное евклидово пространство посредством предварительного обучения на примерах, самоорганизующаяся карта производит непрерывное топологическое отображение $f: B \subset R^{n=3} \rightarrow C \subset R^{m=3}$ посредством самоорганизации, вызванной обучающими векторами $\mathbf{u}$ в C , плотность вероятности которых $p(\mathbf{u})$ [10].

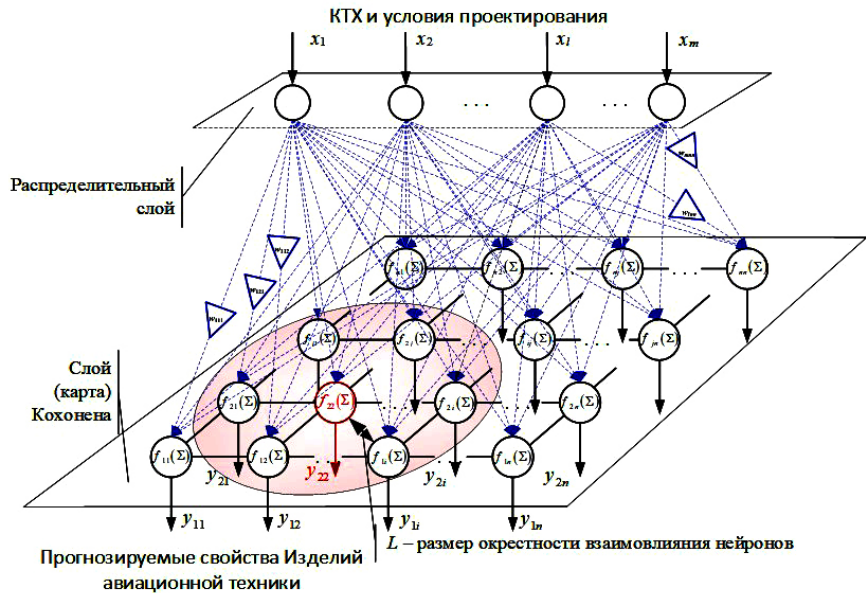


Рис. 2. Архитектура двумерной карты Кохонена в виде регулярной квадратной двумерной решетки
Fig. 2. Architecture of a two-dimensional Kohonen map represented as a regular square grid

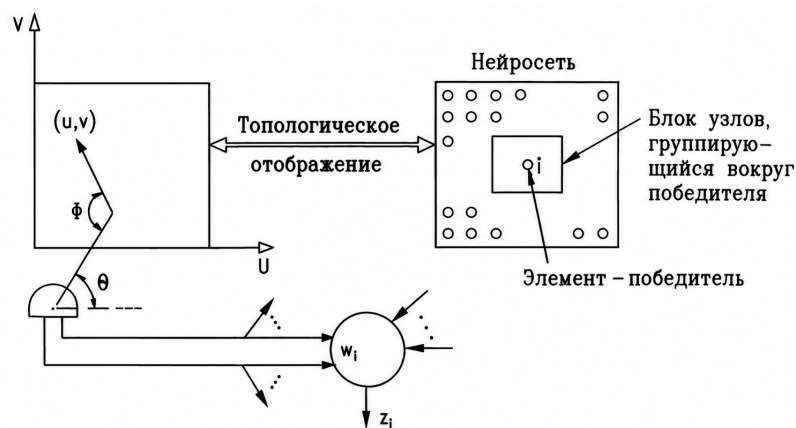


Рис. 3. Иллюстрация топологически непрерывного отображения массива параметров КТХ и условий проектирования в массив прогнозируемых характеристик Изделия (кластеров)
Fig. 3. Topologically continuous mapping of the set of design and technological features and design conditions into the set of predicted product features (clusters)

Каждый из N элементов сети Кохонена получает на вход угловые координаты, (φ, θ) точки пространства (U, V) , причем преобразование $(U, V) \rightarrow (\varphi, \theta)$ является нелинейным (рис. 3).

Каждый элемент сети имеет соответствующий входному вектору весовой вектор W_i , имеющий две компоненты. Кроме этого, элемент нейросети получает выходные сигналы других элементов сети, что используется при конкуренции для выявления узла-победителя.

Методология контроля и прогнозирования характеристик Изделия базируется на последовательном анализе информации, где размерность l определяет объединенный вектор технических параметров и проектных условий X , при этом количество k отражает накопленные прецеденты в протоколе наблюдений Ω_1 . Архив проектной документации содержит базу данных с результатами разработки аналогичных образцов, представленную в структурированном формате:

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} v_1^1, v_2^1, \dots, v_g^1, & z_1^1, z_2^1, \dots, z_l^1, & t^1, & y_1^1, y_2^1, \dots, y_m^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_1^k, v_2^k, \dots, v_g^k, & z_1^k, z_2^k, \dots, z_l^k, & t^k, & y_1^k, y_2^k, \dots, y_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1, & y_1^1, y_2^1, \dots, y_m^1 \\ \dots & \dots \\ x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k, & y_1^k, y_2^k, \dots, y_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^1 & Y^1 \\ \dots & \dots \\ X^k & Y^k \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ — вектор характеристик прогнозируемых свойств изделия, рассчитанный за временной промежуток T , определяется набором k прецедентов из протокола наблюдений первого типа Ω_1 . Протокол наблюдений содержит ограниченное количество проектных условий; для которых точно определены значения $X^i = \{x_j^i\}$, $i = 1, k, j = 1, n$ векторов эксплуатационных характеристик. Распознавание прогнозных показателей нового изделия требует реализации комплексного анализа имею-

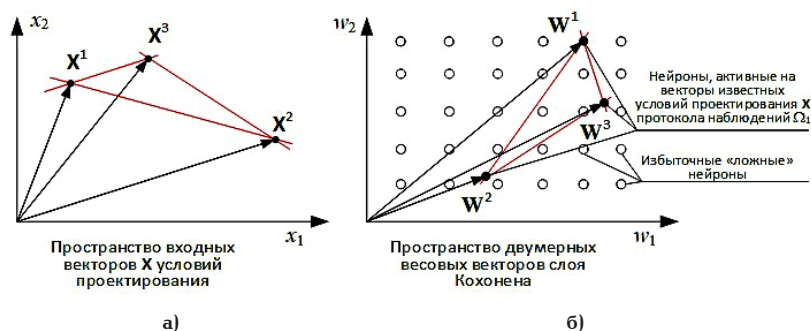


Рис. 4. Подобие топологии условий и результатов проектирования на плоскости:
а) пространство условий проектирования; б) пространство показателей качества спроектированной составной части изделия авиационной техники в слое Кохонена
Fig. 4. Topological similarity of design conditions and design results on a plane:
а) design-condition space; б) quality-indicator space of an aviation component in the Kohonen layer

щихся данных с учетом специфики эксплуатационных параметров $\mathbf{Y}^l = \{y_{ij}^l\}$, $i = 1, k$, $l = 1, m$.

Структурный и параметрический синтез распознающей модели F_2 осуществляется на основе анализа конечного множества k реализаций входного вектора $\mathbf{X}$ с соответствующими значениями вектора $\mathbf{Y}$ из протокола наблюдений Ω_1 , после чего выполняется прогностическая оценка новых векторных аргументов $\mathbf{X}^{k+1}$, не представленных в исходном протоколе при соблюдении заданного уровня точности прогнозирования.

Подход нелинейной нейросетевой экстраполяции содержит три этапа.

Этап 1. Структурный синтез прогнозной модели. Протокол наблюдений или массив прецедентов вида (8) представляет собой матрицу обучающей выборки вида «объект-признак», поэтому первым этапом метода является структурный синтез модели распознавания F_2 в соответствии с размерами входных-выходных векторов задачи контроля. Карта Кохонена содержит n распределительных нейронов во входном слое, по числу компонент вектора КТХ и условий применения проектирования $\mathbf{X}$. Число нейронов слоя Кохонена определяется исходя из следующих соображений. Для каждой компоненты вектора прогнозируемых эксплуатационных свойств $[y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ существует интервал ее изменения:

$$\begin{bmatrix} y_1^{\min}, y_1^{\max} \\ y_2^{\min}, y_2^{\max} \\ \dots \\ y_m^{\min}, y_m^{\max} \end{bmatrix}^T. \quad (9)$$

Сформируем равномерную шкалу ξ_l , $l = \overline{1, m}$:

$$\begin{bmatrix} y_1^0, y_1^{\Delta_1}, y_1^{2\Delta_1}, y_1^{3\Delta_1}, \dots, y_1^{\xi_1\Delta_1} \\ y_2^0, y_2^{\Delta_2}, y_2^{2\Delta_2}, y_2^{3\Delta_2}, \dots, y_2^{\xi_2\Delta_2} \\ \dots \\ y_m^0, y_m^{\Delta_m}, y_m^{2\Delta_m}, y_m^{3\Delta_m}, \dots, y_m^{\xi_m\Delta_m} \end{bmatrix}^T. \quad (10)$$

Каждому из полученных дискретных значений $y_j^{i\Delta_j}$ вектора $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ сопоставляется нейрон m -мерной карты Кохонена. Таким образом, топология и методология параметрического синтеза обучаемой прогнозной нейронной сети определена:

1) одномерным входным слоем распределительных нейронов — кластерных элементов, размером $[1 \times n]$;

2) m -мерным слоем Кохонена размером $[\xi_1 \times \xi_2 \times \dots \times \xi_m]$, в котором нейроны — адаптивные линейные ассоциаторы образуют квадратную m -мерную решетку, где каждый нейрон соответствует набору возможных значений компонент вектора $\mathbf{Y}$, ξ_i — число нейронов для каждого i -го искомого параметра;

3) метрикой сходства входных векторов $\mathbf{X}$ с векторами весов $\mathbf{W}_j$ слоя Кохонена

$$D(\mathbf{X}, \mathbf{W}_j) = \mathbf{X} \cdot \mathbf{W}_j = \|\mathbf{X}\| \|\mathbf{W}_j\| \cos(\mathbf{X}, \mathbf{W}_j), \quad (11)$$

$j = \overline{1, N}$, где

$$N = \prod_{l=1}^m \xi_l; \quad (12)$$

4) m -мерной ядерной функцией взаимовлияния нейронов слоя Кохонена в виде функции Гаусса

$$f(d, \sigma) = e^{-d^2/L^2}, \quad (13)$$

где $L = 2\sigma$ — эффективная ширина функции Гаусса, d — латеральное расстояние между «выигравшим» нейроном и соседними в m -мерной окрестности [10].

Гауссова функция взаимовлияния должна распространяться на все нейроны слоя Кохонена. Данная особенность прогнозной модели обусловлена необходимостью такой настройки отклика нейронов в слое Кохонена, при котором топология соседства нового вектора условий $\mathbf{X}^{k+1}$ в окружении известных условий $\mathbf{X}^i \in \Omega_1$ подобна топологии соседства распознанного вектора $\mathbf{Y}^{k+1}$ в окружении известных условий $\mathbf{Y}^i \in \Omega_1$ (рис. 4).

При функционировании обученной нейронной сети происходит определение нейрона-победителя, характеризующегося наименьшей дистанцией между весовыми коэффициентами и элементами входного вектора $\mathbf{X}^{k+1}$, что позволяет установить конкретные дискретные значения прогнозируемых эксплуатационных характеристик изделия согласно выражениям (8) и (9).

Таким образом, число нейронов слоя Кохонена (12) не задано числом кластеров или числом прецедентов протокола наблюдений Ω_1 , а определяется

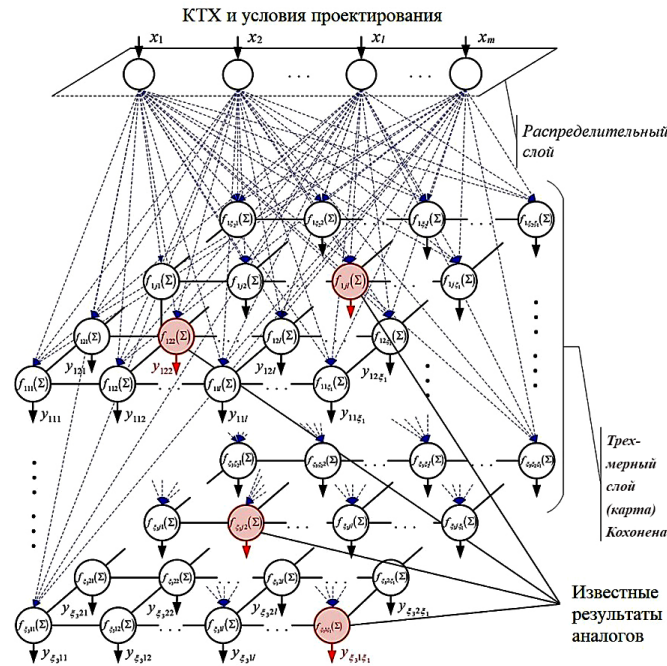


Рис. 5. Модель прогнозирования 3-х параметров на основе архитектуры Self-Organizing Map (SOM) с трехмерной квадратной решеткой слоя Кохонена, где каждый нейрон соответствует определенному условию проектирования
Fig. 5. Forecasting model for three parameters based on a self-organizing map (SOM) architecture with a three-dimensional square grid of the Kohonen layer, where each neuron corresponds to a specific design condition

точностью распознавания вектора Y в новых условиях X^{k+1} , не входящих в протокол наблюдений Ω_1 . А прогнозная модель представляет собой нелинейную проекцию плотности распределения вероятностей $P(X)$ входного вектора данных X в m -мерную область значений функции F_2 . На рис. 5 в качестве примера иллюстрирована архитектура НС для прогноза трех параметров $Y^k = (y_1^k, y_2^k, y_3^k)^T$.

В трехмерном слое Кохонена отмечены нейроны, которые в результате обучения активируются при поступлении на распределительный слой векторов протокола наблюдений Ω_1 .

Этап 2. Параметрический синтез прогнозной модели. Для правильного развития процесса самоорганизации при обучении НС Кохонена требуется, чтобы все нейроны сети были обеспечены достаточным количеством различных реализаций входных образов протокола наблюдений Ω_1 и инициализацией начальных значений весов сети, с наименьшей погрешностью аппроксимирующих обучающую выборку [9].

По условию контроля и прогнозирования вектора Y^{k+1} искусственной нейросетевой аппроксимирующей процедурой значения последнего могут не совпадать с векторами, поэтому для обеспечения необходимой обобщающей характеристики прогнозной модели веса НС необходимо инициализировать линейной процедурой, обеспечивающей упорядоченное начальное состояние весов карты [11].

Этап 3. Применение синтезированной прогнозирующей НС по целевому назначению заключается в получении входного вектора новых условий КТХ и условий проектирования, в которых требуется оценить прогнозные значения эксплуатационных свойств нового Изделия. Входной вектор нормализуется, и для каждого нейрона слоя Кохонена

вычисляется скалярное произведение вектора его весов и входного вектора по формуле (11). Итоговый m -мерный индекс нейрона с минимальным вычисленным значением функции (11) соответствует искомому вектору значений эксплуатационных свойств нового Изделия.

Заключение

В исследовании были описаны этапы реализации метода прецедентного (поискового) прогнозирования свойств проектируемых составных частей изделий авиационной техники при малом числе прецедентов проектирования аналогов, в основе которого лежит подход на основе многомерной линейной экстраполяции. Главное преимущество многомерной линейной экстраполяции применительно к распознаванию характеристик новых изделий авиационной техники сводится к тому, что она позволяет достаточно надежно решать задачу восстановления прогнозной функции F_1 в условиях априорной неопределенности (малое число наблюдаемых прецедентов, малое время проектирования конструктивных аналогов).

При нелинейности восстанавливаемой прогнозной функции методология применима для произвольного количества прецедентов. Определение значений функциональных параметров в новых условиях базируется исключительно на ближайших наблюдениях относительно текущей ситуации, обеспечивая локально-линейную аппроксимацию нелинейной функции F_1 . Разработанный в контексте машинного обучения метод нелинейной экстраполяции характеристик авиационной техники успешно работает при избыточном числе прецедентов. Нейронные сети с конкурентной самоорганизацией, применяемые в качестве классификационной модели, осуществляют проецирование многомерно-

го пространства на редуцированную карту решений при сохранении топологической структуры соседства векторов проектирования и прогнозируемых эксплуатационных параметров.

Список источников / References

1. Анисимов К. С., Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н. [и др.]. Оптимизация процесса совершенствования авиационных комплексов на базе концепции функционального проектирования // Известия РАН. Теория и системы управления. 2022. № 1. С. 105–123. <https://doi.org/10.31857/S0002338822010036>. EDN: MQHLRS.
2. Anisimov K. S., Evdokimenkov V. N., Krasil'shchikov M. N. [et al.]. Optimizatsiya protsessa sovershenstvovaniya aviatsionnykh kompleksov na baze kontseptsii funktsional'nogo proyektirovaniya. *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*. 2022;1:105–123. <https://doi.org/10.31857/S0002338822010036>. EDN: MQHLRS. (In Russ.).
3. Chu T., Pei Y. Intelligent Optimization Design Technology for Typical Structural Parts of Aircraft. *Artificial Intelligence Technologies and Applications*. 2024;382:18–29. <https://doi.org/10.3233/FAIA231279>.
4. Liu Y., Zhang S., Zhang J. [et al.]. Towards the Design of Future Aircraft: A Critical Review On the Tools and Methodologies. *Aerospace Research Communications*. 2024;2:13096. <https://doi.org/10.3389/arc.2024.13096>.
5. Krupa G. P. Application of Agile Model-Based Systems Engineering in aircraft conceptual design. *The Aeronautical Journal*. 2019;123(1268):1561–1601. <https://doi.org/10.1017/aer.2019.53>.
6. Ciampa P. D., Nagel B. AGILE Paradigm: The next generation collaborative MDO for the development of aeronautical systems. *Progress in Aerospace Sciences*. 2020;119:100643. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100643>.
7. Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. *AI Communications*. 2001;7(1):39–59. <https://doi.org/10.3233/AIC-1994-7104>.
8. Queipo N. V., Haftka R. T., Shyy W. [et al.]. Surrogate-based analysis and optimization. *Progress in Aerospace Sciences*. 2005;41(1):1–28. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.02.001>.
9. Simpson T. W., Peplinski J. D., Koch P. N., Allen J. K. Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations. *Engineering with Computers*. 2001;17:129–150. <https://doi.org/10.1007/PL00007198>.
10. Viana F. A. C., Simpson T. W., Balabanov V., Toropov V. Metamodeling in Multidisciplinary Design Optimization: How Far Have We Really Come? *AIAA Journal*. 2014;52(4):670–690. <https://doi.org/10.2514/1.J052375>.
11. Cottrell M., Olteanu M., Rossi F. [et al.]. Self-Organizing Maps, theory and applications. *Revista de Investigacion Operacional*. 2018;39(1):1–22.
12. Kohonen T., Oja E., Simula O. [et al.]. Engineering applications of the self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*. 1996;84(10):1358–1384. <https://doi.org/10.1109/5.537105>.
13. Skuratov V., Kuzmin K., Nelin I., Sedankin M. Application of Kohonen self-organizing map to search for region of interest in the detection of objects. *Eureka: Physics and Engineering*. 2020;1:62–69. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001133>. EDN: NWIMRZ.
14. Jin R., Chen W., Simpson T. W. Comparative Studies of Metamodeling Techniques Under Multiple Modeling Criteria. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2001;23(1):1–13. <https://doi.org/10.1007/s00158-001-0160-4>.
15. Forrester A. I. J., Sybester A., Keane A. J. Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. 228 p. <https://doi.org/10.1002/9780470770801>.
16. Martins J. R. R. A., Lambe A. B. Multidisciplinary Design Optimization: A Survey of Architectures. *AIAA Journal*. 2013;51(9):2049–2075. <https://doi.org/10.2514/1.J051895>.
17. Sobieszcanski-Sobieski J., Haftka R. T. Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments. *Structural Optimization*. 1997;14:1–23. <https://doi.org/10.1007/BF01197554>.
18. Tao F., Zhang M. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*. 2017;5:20418–20427. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069>.
19. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015;3:18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.

Информация об авторе:

МОРГУНОВ Михаил Федорович, аспирант кафедры 904 «Инженерная и компьютерная графика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), г. Москва.
e-mail: Mihailremix@yandex.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 04.12.2025; одобрена после рецензирования 02.02.2026; принята к публикации 27.05.2026.

Information about the author:

MORGUNOV Mikhail Fedorovich, Postgraduate of the 904 Engineering and Computer Graphics Department, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow.
e-mail: Mihailremix@yandex.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The article was submitted 04.12.2025; approved after reviewing 02.02.2026; accepted for publication 27.05.2026.

УДК/UDC 621.316.98

DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-71-78>

EDN: HEMQSY

Научная статья/Original article

АЛГОРИТМ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

А. Г. Люtareвич✉, В. А. Ткаченко, Д. В. Бетев

Югорский государственный университет,
Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

✉ l.alexander@inbox.ru

Важной научно-технической проблемой всегда будет оставаться разработка методов и алгоритмов расчета защиты различных элементов и объектов электроэнергетических систем от прямых ударов молнии или последствий попадания молнии в рядом расположенные сооружения. При этом актуальным является не только совершенствование нормативной и методической базы, но и разработка перспективных инновационных решений. Данные подходы применимы и для молниезащиты объектов энергетики, являющейся важной составляющей электромагнитной обстановки электрических подстанций.

Целью исследования является разработка алгоритма расчета молниезащиты объектов энергетики на основе синтеза существующих методов расчета с учетом действующей электромагнитной обстановки. Приведен обзор нормативных документов, а также аналогичных исследований в данной отрасли электроэнергетики. Анализ рассмотренных источников показывает, что при проектировании устройств молниезащиты различных объектов существуют разделы и области, требующие уточнения методик расчета параметров молниезащиты, представленных в действующих нормативных документах. На основании существующих методик проектирования молниезащиты предложен алгоритм расчета параметров элементов молниезащиты подстанции.

Представленный алгоритм может быть использован для разработки соответствующих программ, позволяющих рассчитывать и строить 3D-модель молниезащиты объектов электроэнергетики.

Ключевые слова: молниезащита, подстанция, молниеотвод, зона защиты, блок-схема, алгоритм расчёта, электромагнитная обстановка

Для цитирования: Люtareвич А. Г., Ткаченко В. А., Бетев Д. В. Алгоритм расчёта параметров молниезащиты объектов энергетики. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 71–78. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-71-78>. EDN: HEMQSY.



© Люtareвич А. Г., Ткаченко В. А., Бетев Д. В., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

CALCULATION ALGORITHM FOR LIGHTNING PROTECTION PARAMETERS OF ENERGY FACILITIES

A. G. Lyutarevich✉, V. A. Tkachenko, D. V. Betev

Yugra State University, Chekhova St., 16, Khanty-Mansiysk, 628011, Russia

✉ l.alexander@inbox.ru

The development of methods and algorithms for calculating the protection of various elements and objects of electric power systems from direct lightning strikes or the consequences of lightning striking

nearby structures will always remain an important scientific and technical problem. Moreover, it is important not only to improve the regulatory and methodological framework, but also to develop promising innovative solutions. These approaches are also applicable to lightning protection of energy facilities, which is an important component of the electromagnetic environment of electrical substations.

The aim of the research is to develop an algorithm for calculating lightning protection for energy facilities, based on a synthesis of existing calculation methods taking into account the current electromagnetic environment. A review of regulatory documents and similar studies in this sector of the electric power industry is provided. An analysis of the reviewed sources shows that when designing lightning protection devices for various objects, there are sections and areas requiring clarification of the methods for calculating lightning protection parameters presented in current regulatory documents. Based on existing lightning protection design methods, an algorithm for calculating the parameters of substation lightning protection elements is proposed.

The presented algorithm can be used to develop appropriate programs that allow calculating and constructing a 3D model of lightning protection for power industry facilities.

Keywords: lightning protection, substation, lightning rod, protection zone, block diagram, calculation algorithm, electromagnetic environment

For citation: Lyutarevich A. G., Tkachenko V. A., Betev D. V. Calculation algorithm for lightning protection parameters of energy facilities. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):71–78. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-71-78>. EDN: HEMQSY. (In Russ.).



© Lyutarevich A. G., Tkachenko V. A., Betev D. V., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

На объектах электроэнергетики электромагнитная обстановка достаточно сильно отличается от электромагнитной обстановки на промышленных предприятиях, в офисах, жилых помещениях и т. п. Как правило, это связано с наличием высоких значений напряженностей электрического и магнитного полей. Большое внимание уделяется молниезащите, так как молния является таким природным явлением, которое оказывает мощные электромагнитные возмущения на энергообъекты. Основным способом защиты электроэнергетических объектов является установка молниеотводов, которые могут быть как отдельно стоящими, так и установленными на конструкциях защищаемого объекта, например на порталах. Однако могут применяться и другие способы, так, например, в работе [1] рассматривается применение недорогих систем молниезащиты для небольших строений, жилых построек и автономных защитных сооружений. При ударе молнии в молниеотвод, который защищает распределительное устройство подстанции, могут происходить нарушения в работе систем автоматики и телемеханики. Поэтому в традиционной практике при расчете параметров молниезащиты определяют не только зоны защиты установленных молниеотводов, но еще и возможные последствия нарушения электромагнитной совместимости объектов. Помимо прочего, использование в последнее время различного дорогостоящего технологического оборудования делает вопросы молниезащиты наиболее актуальными. Указанные вопросы являются важными и в России, и в других странах мира.

Проводятся исследования по мониторингу грозовой активности в регионах России с использованием грозорегистраторов [2, 3]. При этом важными являются исследования по предупреждению грозовой опасности. Так, в своих исследованиях [4] авторы приводят значения тока в канале молнии, которые достигают 47 кА. Также вызывают интерес исследования [5], в которых рассматриваются аномальные процессы грозовой активности, когда

за сутки было зафиксировано порядка 60 тысяч молниевых разрядов.

Кроме того, интерес представляют исследования в области мониторинга данных о разрядах молний с применением данных, получаемых с помощью всемирной сети локализации молний, причем подобные исследования проводятся и в России [6], и за рубежом [7].

В работе [8] исследуются процессы влияния электромагнитного поля внутри подстанции, когда молния попадает в опору электропередачи, расположенную недалеко от подстанции. Представленные расчеты могут оказать помощь при разработке нормативных документов, а также при разработке мероприятий по смягчению последствий от ударов молнии.

Электрические подстанции являются объектами критической инфраструктуры, которые состоят из дорогостоящего оборудования. Попадание молний в такие объекты чаще всего сопровождается различными ущербами: технологическими или экономическими. В работе [9] произведена систематизация параметров и определение направлений исследований по разработке методов оценки риска определения уровня молниезащиты электрических подстанций. С помощью методов анализа и синтеза были выявлены и систематизированы параметры, влияющие на составляющие риска для энергетических объектов, при этом следует учитывать две составляющие: риск гибели людей и риск недоотпуска электрической энергии населению.

Защита объектов электроэнергетики от попадания прямых ударов молний должна закладываться еще на этапе проектирования. Важно определять параметры элементов молниезащиты наиболее оптимально, с одной стороны, чтобы обеспечить требуемую вероятность защиты, и с другой стороны — получить как можно меньшие финансовые затраты. Так, например, в работе [10] проведено моделирование перенапряжения, создаваемого волной проникновения молнии на подстанцию 220 кВ по линии электропередачи, рассмотрены последствия перенапряжения на изоляцию электрообо-

рудования, а также выбрана оптимальная схема защиты подстанции и силового трансформатора. Исследования влияния ударов молнии в отдельный объект на примере телекоммуникационной вышки можно рассмотреть в работе [11]. В данном исследовании представлено влияние прямого удара молнии на конструкцию, а также на основе моделирования изучено распределение поверхностных токов и напряженности электрического поля.

Помимо объектов электроэнергетики — электрических станций и подстанций, которые в связи с высотой оборудования и установок являются потенциальными целями для ударов молний, — в защите нуждаются и другие объекты народного хозяйства, обладающие схожими свойствами. К таким объектам можно отнести резервуары нефтебаз. Исследования молниезащиты нефтебаз рассмотрены в работах [12–14]. В исследованиях изучается вероятность прямого удара молнии в резервуар с плавающей крышей с использованием динамической электрогеометрической модели. В ходе проведенного моделирования изучено влияние различных размеров резервуара на вероятность удара, и результаты показывают, что вероятность удара по краю обода резервуара с плавающей крышей уменьшается с диаметром резервуара и увеличивается с высотой резервуара. Проблема защиты нефтяных резервуаров для стран с высокой грозовой активностью приобретает особую актуальность, в связи с чем постоянно совершенствуется нормативная база по комплексной защите нефтехранилищ и других объектов нефтегазовой промышленности [14].

В последнее время с развитием искусственно-го интеллекта и нейронных сетей наибольший интерес вызывают методы проектирования и оценки последствий с применением данных инструментов. В общем виде нейронные сети представляют собой связь нескольких наук — нейрофизиологии, математики, статистики, компьютерных технологий. Этим и объясняется их широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Но главным достоинством нейронных сетей по сравнению с другими методами является их способность к самообучению. Благодаря гибкости интеллектуальных сетей становятся доступными различные методы динамической молниезащиты и методы молниезащиты на основе искусственного интеллекта. В работе [15] на основе технологий искусственного интеллекта и данных обнаружения молний в реальном времени прогнозируется область сетки, где удары молнии могут произойти в течение получаса в будущем, а площадь составляет около 28 км². Подобные исследования приводятся в работе [16] — представлена разработанная программа с использованием нейронных сетей для прогнозирования точки удара молнии.

В работе [17] рассматривается метод для распределительной системы Smart Grid, который может точно и быстро управлять электросетью на основе технологии динамической молниезащиты. На основе результатов обнаружения молний в реальном времени и в сочетании с главным терминалом динамической молниезащиты интеллектуальной сети данный метод может осуществлять регулирование потоками мощности. В исследовании [18] предлагается новый метод оптимизации проектирования молниезащиты линии 10 кВ системы распределения на основе генетического алгоритма.

При проектировании молниезащиты и заземления подстанции главными факторами являются без-

опасность и бесперебойность электроснабжения. Согласно статистическим данным, многие повреждения на линии электропередачи вызваны ударами молнии, поэтому проектирование молниезащиты линии электропередачи является очень важным вопросом. В работе [19] предлагается алгоритм нейронной сети для оценки и анализа нескольких методов расчета при проектировании и заземлении молниезащиты — сравниваются несколько вариантов расчета молниезащитного заземления воздушных линий. Говоря о молниезащите подстанций, нельзя не принимать во внимание подход к подстанции (воздушные линии электропередачи), ведь исследования показывают, что молния может ударить и в линии электропередачи. Поэтому необходимо защищать также и воздушные линии электропередачи. В той же работе [19] предлагается алгоритм нейронной сети для оценки и анализа нескольких методов расчета при проектировании молниезащиты и заземления воздушных линий, а также сравниваются несколько методов расчета для заземления молниезащиты воздушных линий электропередачи.

Еще одним применением искусственных нейронных сетей является расчет импульсных перенапряжений, вызванных ударами молний [20]. В своей работе авторы для обучения нейронной сети учитывали параметры грунта, а также влияние плотности тока смещения, местоположения удара молнии и высоту воздушной линии. Кроме того, в работе рассматривается метод на основе искусственной нейронной сети для вычисления пиковых перенапряжений, вызванных молнией.

Грозовые перенапряжения считаются одними из наиболее опасных явлений в электрических сетях. При попадании молнии в линию возникающее при этом перенапряжение распространяется на другие компоненты сети: трансформаторы, кабели и др. В связи с чем интерес представляет работа [21], в которой представлено исследование перенапряжений, возникающих в высоковольтных кабельных линиях. В исследовании [22] авторы приводят анализ масштабов экономических потерь и изучение характера последствий удара молнии в низковольтную распределительную линию.

Анализ различных источников указывает на недостаточность нормативно-правовой базы по данному направлению исследований. В работе [23] рассматриваются некоторые практические вопросы на этапах проведения оценки риска и проектирования внешней системы молниезащиты в соответствии со стандартами IEC 62305 для здания со сложной формой крыши, например двух башенной.

Важнейшим аспектом при построении системы молниезащиты электрических подстанций является правильно рассчитанное заземляющее устройство. Для повышения эффективности электрических систем заземления применяются различные материалы обратной засыпки. Так, в работе [24] представлен всесторонний обзор подобных материалов обратной засыпки, используемых для электрического заземления. В исследовании [25] представлена информация о промышленном использовании материалов для обратной засыпки на основе бентонита в сочетании с электрическими системами заземления. Также вызывает особый интерес исследование [26], где представлены результаты долгосрочного эксперимента по активному методу снижения сопротивления заземления. Метод использует агент снижения сопротивления заземления на основе природного бентонита и алюминиевого жертвенно-

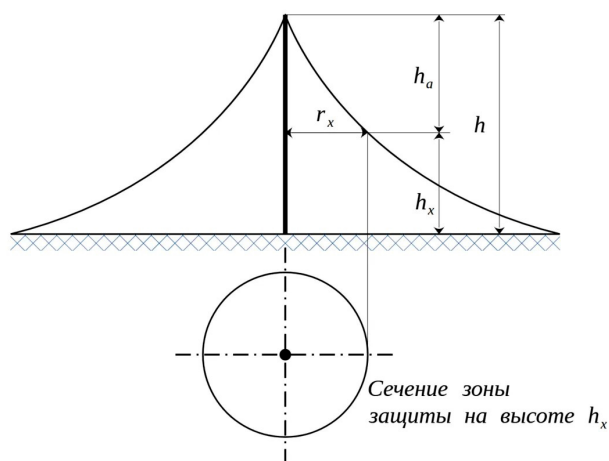


Рис. 1. Зона защиты молниеотвода, представляющая шатер
Fig. 1. Lightning protection zone as a tent

го электрода. В своих работах [27–29] авторы рассматривают методы расчета заземлителей, а также приводят расчеты параметров заземлителей под воздействием различных факторов.

Таким образом, **целью исследования** является разработка алгоритма расчета молниезащиты объектов энергетики на основе синтеза существующих методов расчета с учетом действующей электромагнитной обстановки.

Обеспечение правильной молниезащиты на объектах электроэнергетики способствует улучшению электромагнитной обстановки, необходимой вследствие высокой чувствительности автоматизированных систем технологического управления. Это ускорит процесс цифровизации энергообъектов путем уменьшения воздействия электромагнитных возмущений при ударе молнии в пределах защищаемого объекта.

Методика

Практика эксплуатации энергообъектов указывает на то, что, несмотря на идеальное соблюдение абсолютно всех указаний, изложенных в нормативно-технических документах по выполнению защиты объектов электроэнергетики от ударов молнии, полностью защитить энергообъект не удастся. Во времена, когда грозы становятся не редким явлением, происходят множественные технологические нарушения в работе оборудования энергообъектов. Низкая эффективность защиты объектов от попадания молнии связана с тем, что необходимо усовершенствование всей этой нормативно-технической документации. Анализ методик расчета параметров молниезащиты, представленных в действующих нормативных документах^{1, 2}, показывает, что зона защиты молниеотвода представляет собой шатер (рис. 1) или конус (рис. 2)^{3, 4}.

Анализ рассмотренных источников показывает, что при проектировании устройств молниезащиты

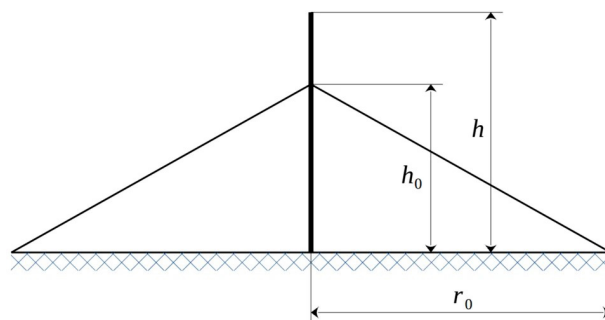


Рис. 2. Зона защиты молниеотвода, представляющая конус
Fig. 2. Lightning protection zone, representing a cone

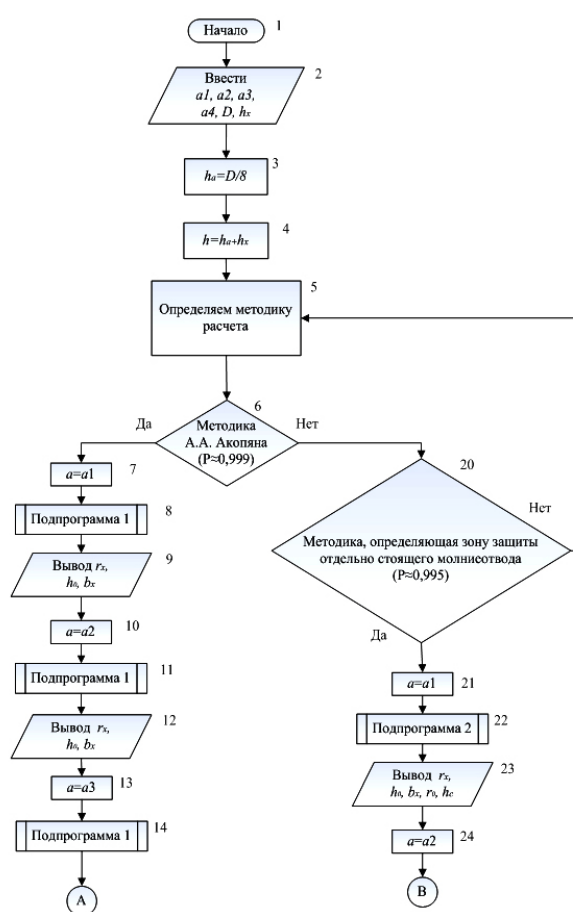


Рис. 3. Блок-схема алгоритма построения молниезащиты
Fig. 3. Block diagram of the algorithm of the lightning protection design

различных объектов существуют разделы и области, требующие уточнения методик расчета параметров молниезащиты, представленных в действующих нормативных документах.

¹ РД 34.21.122–87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 32 с.

² СО 153-343.21.122–2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. Москва: МЭИ, 2004. 29 с.

³ ВСП 22-02-07/МО РФ. Нормы по проектированию, устройству и эксплуатации молниезащиты объектов военной инфраструктуры. Москва, 2007. 168 с.

⁴ Стандарт по молниезащите МЭК 62305. В 5 ч. Ч. 3. Защита зданий и сооружений от повреждений и защита людей и животных от электротравматизма. Москва, 2003. 147 с.

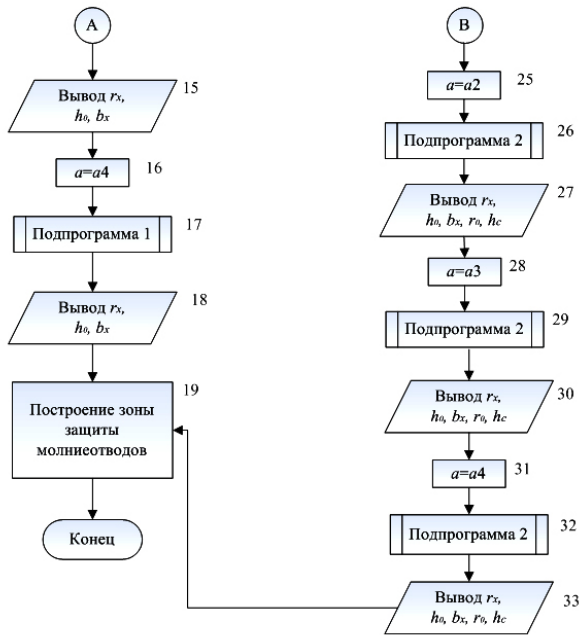


Рис. 4. Блок-схема алгоритма построения молниезащиты (продолжение рис. 3)
Fig. 4. Block diagram of the lightning protection design algorithm (continued of the Fig. 3)

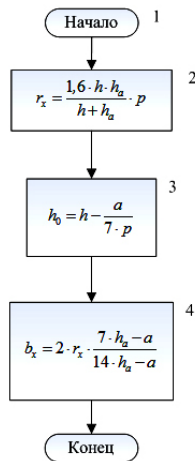


Рис. 5. Блок-схема подпрограммы алгоритма построения молниезащиты по Методике 1
Fig. 5. Block diagram of the subroutine of the algorithm of the constructing lightning protection by the Method 1

Результаты

На рис. 3, 4 представлена основная блок-схема алгоритма построения молниезащиты с четырьмя молниеотводами, блок-схема алгоритма подпрограммы (рис. 5), вычисляющая параметры молниезащиты по методике профессора А. А. Акопяна (далее — Методика 1) [30, 31] и определяющая параметры молниезащиты. И блок-схема алгоритма подпрограммы построения молниезащиты, вычисляющая параметры молниезащиты по методике защиты объекта с помощью молниеотводов, установленных обособленно (далее — Методика 2) (рис. 6), в которой, для того чтобы упростить расчетные

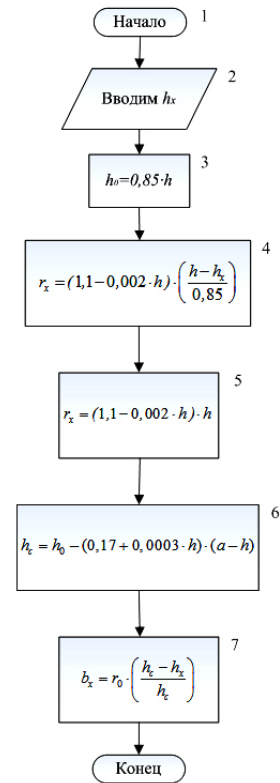


Рис. 6. Блок-схема подпрограммы алгоритма построения молниезащиты для отдельно стоящего молниеотвода
Fig. 6. Block diagram of the subroutine of the algorithm of the constructing lightning protection for a free-standing lightning rod

формулы зон защиты молниеотвода, предложенные А. А. Акопяном, делается допущение, что зона защиты одиночного молниеотвода представляет собой конус.

1. Вводим основные данные, необходимые для расчёта молниезащиты энергообъекта: расстояние между молниеотводами (a_1, a_2, a_3, a_4), диаметр окружности, проведенной через 3 молниеотвода (D), высоту портала (h_x).

2. Следующим этапом найдем активную зону h_a по формуле:

$$h_a \geq \frac{D}{8}. \quad (1)$$

3. Производим расчет высоты молниеотводов h по формуле:

$$h = h_a + h_x. \quad (2)$$

4. Определяем методику расчёта. В случае выбора Методики 1 переходим к блоку 7, указанному на блок-схеме (рис. 4), либо к Методике 2 (блоки 20–33).

5. По Методике 1 (блоки 7–18) вычисляются радиус зоны на высоте h_x , граница зоны защиты между молниеотводами, расположенная на высоте h_0 , наименьшая ширина b_x зоны защиты на высоте h_x с помощью подпрограммы 1 (рис. 5).

6. Подпрограмма 1. Блок-схема подпрограммы алгоритма построения молниезащиты по Методике 1 (рис. 5):

Радиус зоны в зависимости от высоты можем определить по выражению

$$r_x = \frac{1,6 \cdot h \cdot h_a}{h + h_a} \cdot p, \quad (3)$$

где $p = 1$ при высоте молниеотвода ≤ 30 м и $p = 5,5 / \sqrt{h}$, если высота молниеотвода находится в диапазоне $30 < h < 60$ м.

Границу зоны, проходящую через точку на высоте h_0 , можно определить по выражению

$$h_0 = h - \frac{a}{7 \cdot p}. \quad (4)$$

Ширина наименьшей зоны b_x на высоте h_x между двумя молниеотводами, определяемая по указанной ниже формуле,

$$b_x = 2 \cdot r_x \cdot \frac{7 \cdot h_a - a}{14 \cdot h_a - a}. \quad (5)$$

7. При выборе второй методики расчета молниезащиты энергообъекта (блоки 21–33) производятся расчеты во 2-й подпрограмме (рис. 6). Они включают в себя:

определение высоты конуса

$$h_0 = 0,85 \cdot h; \quad (6)$$

определение радиуса конуса, на высоте защищаемого сооружения

$$r_x = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot \left(\frac{h - h_x}{0,85} \right); \quad (7)$$

определение радиуса защиты на уровне земли

$$r_0 = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot h; \quad (8)$$

определение высоты между молниеотводами по следующему выражению

$$h_c = h_0 - (0,17 + 0,0003 \cdot h) \cdot (a - h). \quad (9)$$

Зона защиты на высоте h_x , имеющая наименьшую ширину b_x , между молниеотводами определяется по формуле

$$b_x = r_0 \cdot \left(\frac{h_c - h_x}{h_c} \right). \quad (10)$$

8. На основании расчетов Методики 1 или Методики 2 строится зона молниезащиты энергообъекта со степенью надежности $P \approx 0,999$ или $P \approx 0,995$ соответственно.

Обсуждение

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы: большое внимание уделяется молниезащите в связи с тем, что молния является таким природным явлением, которое оказывает мощные электромагнитные возмущения на энергообъектах. Определено, что основным способом защиты электроэнергетических объектов от прямых ударов молнии является установка молниеотводов.

Импульсные напряжения, возникающие вследствие удара молнии, могут привести к нарушению функционирования устройств релейной защиты автоматики и телемеханики. Поэтому необходимо подходить к вопросам проектирования молниезащиты с учетом электромагнитной совместимости на энергообъекте для предотвращения нарушения функционирования оборудования.

Анализ методик и проведенные расчеты указывают на то, что радиус зоны защиты молниеотвода на высоте, равной половине высоты молниеотвода, может значительно изменяться от максимального до минимального значения. Это, в свою очередь, влияет на точность расчетов, говоря не просто о долях, а о нескольких процентах. Таким образом, ставилась задача разработать гибридный алгоритм, который позволит повысить надежность зоны защиты, и будет обладать простотой реализации для дальнейшей разработки прикладной программы расчета молниезащиты.

Заключение

На основании рассмотренных методов расчета параметров молниезащиты предложен гибридный алгоритм, в основе которого лежат методика, разработанная профессором А. А. Акопяном и методика расчета отдельно стоящего молниеотвода. Предложенный алгоритм может быть использован для разработки соответствующих программ, позволяющих рассчитывать и строить 3D-модель молниезащиты, что ускорит процесс проектирования объектов энергетики.

Финансирование / Funding

Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Разработка моделей вейвлет-анализа нестационарных режимов электрических сетей для повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей», код темы: FENG-2023-0005).

The research was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation ("Development of wavelet analysis models for non-stationary modes of electrical networks to improve the reliability and efficiency of power supply to consumers", theme code: FENG-2023-0005).

Список источников / References

1. Gomes C., Guthrie M. Development of cost-effective lightning protection measures for underprivileged communities. *12th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/APL57308.2023.10181896>.
2. Аджиев А. Х., Кулиев Д. Д., Стасенко В. Н. Оценка параметров работоспособности грозопопеленгационных систем LS8000 и ENTLS в регионе Северного Кавказа // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 4. С. 117–126. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-4-117-126>. EDN: RASRGX.
- Adzhiev A. Kh., Kuliev D. D., Stasenkov V. N. Evaluation of performance parameters of lightning direction finding systems LS8000 and ENTLS in the north caucasus region. *Meteorology and Hydrology*. 2022;4:117–126. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-4-117-126>. EDN: RASRGX. (In Russ.).
3. Аджиев А. Х., Кереева З. М., Гятов Р. А. Пространственно-временная изменчивость грозовой активности на территории Северного Кавказа // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2023. № 3 (389).

C. 152–164. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-3-152-164>. EDN: GWQEUO.

Adzhiev A. H., Kerefova Z. M., Gyatov R. A. Spatiotemporal variability of thunderstorm activity in the north Caucasus. *Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2023;3(389):152–164. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-3-152-164>. EDN: GWQEUO. (In Russ.).

4. Аджиев А. Х., Шагин С. И., Керефова З. М., Дахова О. О. Плотность распределения грозовых разрядов по Северо-Кавказскому федеральному округу // Геология, география и глобальная энергия. 2023. № 3 (90). С. 55–60. https://doi.org/10.54398/20776322_2023_3_55. EDN: WUCOLD.

Adzhiev A. Kh., Shagin S. I., Kerefova Z. M., Dachova O. O. Lightning distribution density in the north caucasus federal district. *Geology, Geography and Global Energy*. 2023;3(90):55–60. https://doi.org/10.54398/20776322_2023_3_55. EDN: WUCOLD. (In Russ.).

5. Аджиев А. Х., Куповых Г. В., Юрченко Н. В., Керефова З. М. Аномальный грозовой процесс на территории Ростовской области // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2024. № 2 (222). С. 50–56. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-2-50-56>. EDN: XZGKFR.

Adzhiev A. Kh., Kupovykh G. V., Yurchenko N. V., Kerefova Z. M. Anomal thunderstorm process in the territory of the Rostov region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2024;2(222):50–56. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-2-50-56>. EDN: XZGKFR. (In Russ.).

6. Каранин А. В., Кочеева Н. А., Беликова М. Ю., Какорин В. А. Энергия и суточный ход молниевой активности в локациях пожаров от гроз на территории Республики Алтай // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2023. № 4 (220). С.91–102. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-91-102>. EDN: DYQBYC.

Karanin A. V., Kocheeva N. A., Belikova M. Yu., Kakorin V. A. Energy and diurnal rate of thunderstorm activity in the lightning initiated wildfire locations on the Altai Republic territory. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;4(220):91–102. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-91-102>. EDN: DYQBYC. (In Russ.).

7. Mata C. T., Hill J. D. Performance Evaluation of Non-Conventional Lightning Protection Systems Based on NLDN Data. *2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2022. <https://doi.org/10.1109/ICLP56858.2022.9942523>.

8. Dawalibi F., Li Y. Analysis of a Direct Lightning Impact on a Substation and its Protection Equipment. *2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/SIPDA59763.2023.10349132>.

9. Glebov O. Y., Koliushko D. G., Kiprych S. V., Rudenko S. S. The Problem of Determining the Level of Lightning Protection for Electrical Substations by the Risk Assessment Method. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916320>.

10. Liu B., Ding L., He D., Hu C. Study on Lightning Protection Measures for 220 kV Substation. *2021 International Conference on Electronic Information Technology and Smart Agriculture (ICEITSA)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ICEITSA54226.2021.00029>.

11. Denov B., Hidayat S., Zoro R. [et al.]. A Simulation Study on Lightning Current Distribution in Telecommunication Tower. *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS53178.2021.9601143>. EDN: OETSXD.

12. Ibrahim W., Zaki R. Enhancement of the Lightning Protection System of Floating Roof Oil Tanks by Improving its Grounding System. *2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2022. <https://doi.org/10.1109/ICLP56858.2022.9942559>.

13. Adekitan A., Rock M. The Undesirable Interaction of Lightning Strike and Floating Roof Tanks. *2021 35th International Conference on Lightning Protection (ICLP) and XVI International*

Symposium on Lightning Protection (SIPDA). 2021. <https://doi.org/10.1109/ICLPandSIPDA54065.2021.9627432>. EDN: TOTREG.

14. Denov B., Zoro R., Suwarno, Hidayat S. Evaluation of NFPA 780 Standard for Lightning Protection of Oil and Gas Installation in Indonesia. *2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/SIPDA59763.2023.10349135>.

15. Shu Q., Tong C., Gong L. Real-Time Lightning Stroke Area Trend Prediction Based on Lightning Energy Estimation. *2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/SIPDA59763.2023.10349101>.

16. Khelil D., Bouazabia S., Mikropoulos P. N. [et al.]. Prediction of the lightning discharge impact point by neural networks. *IET Conference Proceedings*. 2023;46:748–751. <https://doi.org/10.1049/icp.2024.0614>. EDN: BYZJPZ.

17. Xiang M., Xu Y., Tong C. [et al.]. A Method of Dynamic Control of the Power Grid based on Real-time Lightning Tracking. *2021 35th International Conference on Lightning Protection (ICLP) and XVI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ICLPandSIPDA54065.2021.9627370>.

18. Nie Y. Optimization Design of Distribution Line Lightning Protection Based on BP Neural Network Algorithm. *2022 Euro-Asia Conference on Frontiers of Computer Science and Information Technology (FCSIT)*. 2022. <https://doi.org/10.1109/FCSIT57414.2022.00023>.

19. Zhang K. Research on Several Calculation Methods for Lightning Protection and Grounding of Overhead Transmission Lines. *2023 3rd International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/SMARTGENCON60755.2023.10442211>.

20. Ain N., Mahmood F., Rizk M. A Neural Network Based Prediction System for Lightning Induced Over-Voltages on Overhead Lines Considering the Soil Electrical Parameters. *2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2022. <https://doi.org/10.1109/ICLP56858.2022.9942611>.

21. Pandey A. P., Das A., Reddy C. C. Transient Over Voltages in Cross-Bonded Power Cables due to Lightning Impulse. *2022 IEEE 10th Power India International Conference (PIICON)*. 2022. <https://doi.org/10.1109/PIICON56320.2022.10045121>.

22. Ghimire B., Sharma S., Karki P. [et al.]. Impact of a lightning strike on a low voltage transmission line: A case study from Fujel Gorkha, Nepal. *2023 12th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/APL57308.2023.10181409>.

23. Gomes A., Gomes C. Challenges in Conducting Risk Assessment and Designing Protection Measures as per IEC 62305 for a Twin Tower of Different Heights. *2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2022. <https://doi.org/10.1109/ICLP56858.2022.9942666>.

24. Sattar M. Q., Gomes C. Backfill Materials for Enhancing the Performance of Electrical Grounding Systems: An Analytical Revisit. *2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2022. <https://doi.org/10.1109/ICLP56858.2022.9942517>.

25. Sabry R. Z., Gomes A., Gomes C. Frequency Dependent Resistivity of Soil, Bentonite and Soil-Bentonite Mixes: With Special Attention to Electrical Grounding Systems. *2021 35th International Conference on Lightning Protection (ICLP) and XVI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ICLPandSIPDA54065.2021.9627440>.

26. Hamzah M. N., Gomes C., Afiq M., Ab Kadir M. Z. A. Performance of Active Electrical Earthing Systems: Results and Discussion. *2023 12th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/APL57308.2023.10182183>.

27. Шишигин С. А., Шишигин Д. С., Смирнов И. Н. Расчет заземлителей с учетом ионизации и частотных свойств грунта // Известия РАН. Энергетика. 2022. № 6. С. 46–63. <https://doi.org/10.31857/S0002331022060024>. EDN: QRBLNH.

Shishigin S. L., Shishigin D. S., Smirnov I. N. Calculation of grounding devices taking into account ionization and frequency properties of the soil. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 2022;6:46–63. <https://doi.org/10.31857/S0002331022060024>. EDN: QRBLNH. (In Russ.).

28. Шишигин С. Л., Шишигин Д. С., Смирнов И. Н. Вероятность обратного перекрытия изоляции опоры воздушной линии с учетом ионизации и частотных характеристик грунта // *Электричество*. 2023. № 2. С. 27–36. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2023-2-27-36>. EDN: APBLMV.

Shishigin S. L., Shishigin D. S., Smirnov I. N. Back Flashover Probability of the Overhead Power Line Insulation Taking into Account the Soil Ionization and Frequency Response Features. *Elektrichestvo*. 2023;2:27–36. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2023-2-27-36>. EDN: APBLMV. (In Russ.).

29. Onyedikachi S. N., Gomes C. Modeling Performance Variation of Earthing Enhancement Materials in Different Soils and Conditions. *2024 32nd Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC)*. 2024. <https://doi.org/10.1109/SAUPEC60914.2024.10445044>.

30. Акопян А. А. Исследование защитного действия молниеотводов на моделях // *Электричество*. 1937. № 9-10. С. 20–25.

Akopyan A. A. Investigation of lightning-diverter protective value on models. *Elektrichestvo*. 1937;9:10:20–25. (In Russ.).

31. Акопян А. А. Защитное действие одиночного стержневого молниеотвода // *Электричество*. 1937. № 24. С. 11–14.

Akopyan A. A. Zashchitnoye deystviye odinochnogo sterzhnovego molniyeotvoda. *Elektrichestvo*. 1937;24:11–14. (In Russ.).

Вклад авторов:

А. Г. Лютаревич. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, формулировка гипотезы о недостаточности существующих норм, выбор направления синтеза двух методик, анализ электромагнитной обстановки как ключевого фактора, общее редактирование текста, формулировка выводов.

В. А. Ткаченко. Разработка блок-схем алгоритма, реализация двух подпрограмм, вывод и адаптация расчетных формул.

Д. В. Бетев. Развернутый обзор отечественных и зарубежных источников, анализ существующих нормативных документов, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами.

Authors' contribution:

Aleksandr G. Lyutarevich. Setting the aim, objectives and the scientific problem, formulating a hypothesis about the inadequacy of existing standards, choosing the direction of synthesis of two methods, analysing the electromagnetic environment as a key factor, general editing of the text, formulating conclusions.

Vsevolod A. Tkachenko. Development of algorithm flowcharts, implementation of two subroutines, derivation and adaptation of calculation formulae.

Denis V. Betev. Comprehensive review of domestic and foreign sources, analysis of existing regulatory documents, identification of shortcomings of existing methods, comparison with alternative approaches.

Информация об авторах:

ЛЮТАРЕВИЧ Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент Политехнической школы

Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск.

SPIN-код: 7525-1609

AuthorID (РИНЦ): 174437

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7503-1512>

AuthorID (SCOPUS): 57188871750

ResearcherID: D-9400-2014

e-mail: l.alexander@inbox.ru

ТКАЧЕНКО Всеволод Андреевич, кандидат технических наук, доцент Политехнической школы Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск.

SPIN-код: 5200-0062

AuthorID (РИНЦ): 939477

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7321-1162>

AuthorID (SCOPUS): 57210291005

ResearcherID: W-3652-2019

e-mail: sevaatmail@yandex.ru

БЕТЕВ Денис Владимирович, аспирант Политехнической школы Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск.

e-mail: betevdv@rambler.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2026; принята к публикации 02.06.2026.

Information about the authors:

LYUTAREVICH Aleksandr Gennad'yevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk.

SPIN-code: 7525-1609

AuthorID (RSCI): 174437

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7503-1512>

AuthorID (SCOPUS): 57188871750

ResearcherID: D-9400-2014

e-mail: l.alexander@inbox.ru

TKACHENKO Vsevolod Andreyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk.

SPIN-code: 5200-0062

AuthorID (RSCI): 939477

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7321-1162>

AuthorID (SCOPUS): 57210291005

ResearcherID: W-3652-2019

e-mail: sevaatmail@yandex.ru

BETEV Denis Vladimirovich, Postgraduate of the Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk.

e-mail: betevdv@rambler.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 24.10.2025; approved after reviewing 10.02.2026; accepted for publication 02.06.2026.

ПРОБЛЕМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОНДУКТИВНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

К. С. Мочалин¹, Ю. М. Денчик¹, А. И. Антонов², Д. Ю. Руди²✉, А. А. Руппель²

¹Сибирский государственный университет водного транспорта,
Россия, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

²Омский институт водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного университета водного транспорта,
Россия, 644099, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 4

✉ dima_rudi@mail.ru

Обеспечение качества электроэнергии и электромагнитной совместимости на сегодняшний день является первоочередной задачей энергетической безопасности. Энергетическая инфраструктура рассматривается как одна из критически важных инфраструктур РФ. Введение современного электрооборудования и его систем управления на предприятиях различных отраслей промышленности приводит к снижению качества электроэнергии в энергосистемах. Развитие промышленности в РФ и непрерывный рост мощностей электропотребителей приводит к нарушению нормативно-технической документации применительно к качеству электроэнергии. Это, в свою очередь, уменьшает помехоустойчивость и приводит к возникновению кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех в сети. Данные обстоятельства обуславливают значимость проблемы качества электроэнергии и электромагнитной совместимости.

Цель исследования — изучить пути появления и распространения кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех и способы их ослабления.

Была сформирована последовательность действий по анализу и определению кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех. Рассмотрены вопросы изучения природы возникновения кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех, их распространение в электроэнергетических системах и способы борьбы с ними.

Внедрение современных тенденций и методов по устранению электромагнитных помех позволит не только заранее оценить влияние помех на элементы электроэнергетических систем, но и надёжность, экономичность и устойчивость электроснабжения.

Ключевые слова: качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи, кондуктивная помеха, помехоустойчивость, энергосистема, нормативно-техническая документация

Для цитирования: Мочалин К. С., Денчик Ю. М., Антонов А. И., Руди Д. Ю., Руппель А. А. Проблема возникновения кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех в электроэнергетике. Омский научный вестник. 2026. № 2 (198). С. 79–87. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-79-87>. EDN: BXFHGR.



© Мочалин К. С., Денчик Ю. М., Антонов А. И.,
Руди Д. Ю., Руппель А. А., 2026.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROBLEM OF EMERGING THE CONDUCTIVE LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

K. S. Mochalin¹, Yu. M. Denchik¹, A. I. Antonov², D. Yu. Rudi²✉, A. A. Ruppel²

¹Siberian State University of Water Transport, Shchetinkina St., 33, Novosibirsk, 630099, Russia

²Omsk Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport, Ivana Alekseyeva St., 4, Omsk, 644099, Russia

✉ dima_rudi@mail.ru

Providing the quality of electricity and electromagnetic compatibility is currently a high priority for energy security. The energy infrastructure is considered as one of the critically important infrastructures of the Russian Federation. The introduction of modern electrical equipment and their control systems in enterprises of various industries leads to a decrease in the electricity quality. The development of industry in the Russian Federation and the continuous growth of the capacity of electric consumers lead to a violation of regulatory and technical documentation regarding the quality of electricity. Thus, it reduces the noise immunity and leads to the conductive low-frequency electromagnetic interference. These facts determine the importance of the problem of electricity quality and electromagnetic compatibility.

The aim of the research is to study the ways of the emergence and distribution of the conductive low-frequency electromagnetic interference and ways of their attenuation.

The authors present a sequence of actions for the analysis and determination of the conductive low-frequency electromagnetic interference. Moreover, the authors consider issues of studying the nature of emerging the conductive low-frequency electromagnetic interference, its spread in electric power systems and ways to deal with them.

The implementation of modern trends and methods to eliminate electromagnetic interference allows not only assessing in advance the impact of interference on the elements of electric power systems, but also on the reliability, efficiency and stability of power supply.

Keywords: electricity quality, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, conductive interference, noise immunity, power system, regulatory and technical documentation

For citation: Mochalin K. S., Denchik Yu. M., Antonov A. I., Rudi D. Yu., Ruppel A. A. Problem of emerging the conductive low-frequency electromagnetic interference in the electric power industry. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):79–87. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-79-87>. EDN: BXFHGR. (In Russ.).



© Mochalin K. S., Denchik Yu. M., Antonov A. I., Rudi D. Yu., Ruppel A. A., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В связи с развитием полупроводниковой продукции увеличение производственных мощностей приводит к значительному искажению качества электроэнергии, что, в свою очередь, влечет за собой появление в электросистеме кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех (ЭМП). Сами кондуктивные низкочастотные ЭМП по своей сути являются электромагнитными волнами, которые генерируются определёнными промышленными и бытовыми электропотребителями. Данное взаимодействие с чувствительным электрооборудованием приводит к возникновению нежелательных токов и напряжений, которые негативно влияют на работу электрооборудования [1, 2]. Простой производства, выход из строя электрооборудования, а также финансовые потери приводят к отрицательным последствиям в производительности и безопасности электрических систем [3, 4], особенно в критически важных сферах производства, таких как медицина, аэро- и космические технологии и т. д. Кроме того, следует знать, что существуют контролирующие

органы, которые устанавливают нормы ЭМП для обеспечения качества электроэнергии и электромагнитной совместимости (ЭМС). В связи с вышеизложенным проблема кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех и электромагнитной совместимости актуальна в настоящее время. Цель статьи — изучить пути появления и распространения кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех и способы их ослабления.

Основная часть

Проблема снижения качества электроэнергии как частный случай ЭМС появилась вследствие обширного использования в электроэнергетических системах предприятий различной отрасли мощных специфических энергоустановок (вентильные преобразователи, дуговые сталеплавильные печи, бытовые электроприборы). Данные электроприёмники повышают эффективность (технологическую и экономическую) производственных процессов предприятий различных отраслей и облегчают жизнь потребителей, однако оказывают отрицательное

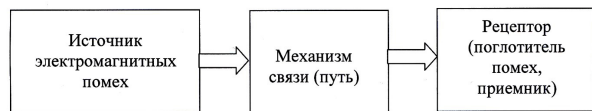


Рис. 1. Схема влияния источника электромагнитных помех на рецептор
Fig. 1. Diagram of the effect of the electromagnetic interference source on the receptor

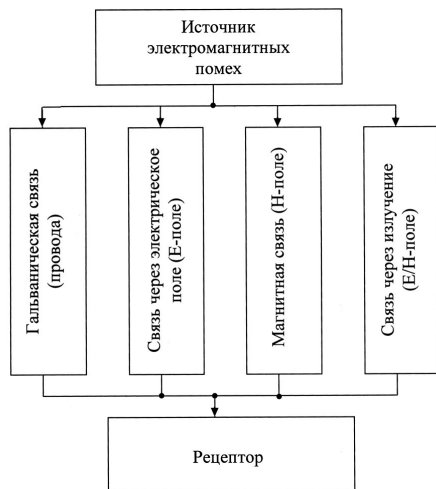


Рис. 2. Механизм связи источника электромагнитных помех и рецептора
Fig. 2. Mechanism of the connection between the electromagnetic interference source and the receptor

влияние на качество электроэнергии, что требует применения системного, научно обоснованного подхода.

Качество электроэнергии и ЭМС взаимосвязаны. Данные понятия определяют способность технических средств функционировать в электрической сети без взаимного негативного влияния. Качество электроэнергии влияет на уровень кондуктивных низкочастотных ЭМП, которые определяют степень ЭМС в системе. Низкое качество электроэнергии (гармонические искажения, несимметрия напряжений, медленные изменения напряжений, отклонение частоты, доза фликера и т. д.) приводит к увеличению кондуктивных низкочастотных ЭМП, что может нарушить работу подключённого оборудования.

Состояние вопроса

Существует несколько ключевых концепций, которые связаны с изучением природы возникновения ЭМП [5, 6]. Кондуктивные (проводимые) низкочастотные ЭМП возникают, когда помеха распространяется по кабельным линиям. Они обычно генерируются при работе высокочастотного электрооборудования. Данные помехи нарушают работу чувствительного оборудования, которое подключено к тем же электрическим сетям. Также имеются и другие виды ЭМП:

— индуктивные (излучаемые) ЭМП являются электромагнитным излучением, которое распространяется в окружающей среде. Источниками данных помех являются радиочастотное оборудование и коммутационные устройства высокой частоты. Последствием данных помех на электросеть является наличие нежелательных электромагнитных

волн, которые оказывают воздействие на радио- и цифровое оборудование и ставят под угрозу целостность системы;

— синфазные и дифференциальные ЭМП возникают, когда осуществляется воздействие на проводник в кабельных линиях. Эффект синфазных ЭМП сказывается на оба проводника, а в случае дифференциальных ЭМП — только на один проводник.

Появление данных ЭМП в энергосистеме возможно из-за несимметрии напряжений и токов, неравномерного комплексного сопротивления и т. д. Негативными последствиями для электрооборудования являются шумы, ухудшение работы измерительного оборудования, сбои, прерывания, искажения сигнала.

Зная причины возникновения кондуктивных низкочастотных ЭМП, научные сотрудники и технические специалисты могут внедрять эффективные методы и способы борьбы с негативным воздействием кондуктивных низкочастотных ЭМП на элементы электрических сетей. Однако форма появления кондуктивных низкочастотных ЭМП различна, что доставляет определенные трудности по проработке стратегии по их устранению.

Интерференция в электрических сетях появляется в непосредственной близости от источника электромагнитного излучения. Интерференция является взаимодействием двух или более волн, которое приводит к устойчивому усилению или ослаблению интенсивности волн. Чем ближе к чувствительному электрооборудованию наблюдается данная кондуктивная низкочастотная ЭМП, тем сложнее её устранить.

Кондуктивные низкочастотные ЭМП происходят от различных источников естественного или искусственного характера, способных негативно воздействовать на производительность электрооборудования. Изучение причин возникновения кондуктивных низкочастотных ЭМП критически важно для применения эффективных мер по борьбе с кондуктивными низкочастотными ЭМП и для обеспечения надежности электроэнергетических систем.

Негативное воздействие источника кондуктивных низкочастотных ЭМП на рецептор передается через механизм связи (рис. 1). Между передатчиком и приёмником кондуктивных низкочастотных ЭМП возможно несколько функционирующих связей (рис. 2).

При анализе кондуктивных низкочастотных ЭМП используется термин «путь связи источника и рецептора ЭМП», объединяющий несколько каналов распространения этих помех. Например, на рис. 3 представлен путь проникновения кондуктивных низкочастотных ЭМП в техническое средство и излучения из него, на основании которого формируется положение. Помехи проникают в техническое средство несколькими способами.

Электрические машины (трансформаторы, асинхронные двигатели и их система управления) являются основными источниками кондуктивных низкочастотных ЭМП. При функционировании данных электропотребителей генерируются электромагнитные поля, создающие помехи другому электрооборудованию, чувствительному к кондуктивным низкочастотным ЭМП [7]. Микропроцессорные системы управления, также входящие в состав электрооборудования, генерируют высокочастотные кондуктивные низкочастотные ЭМП, которые

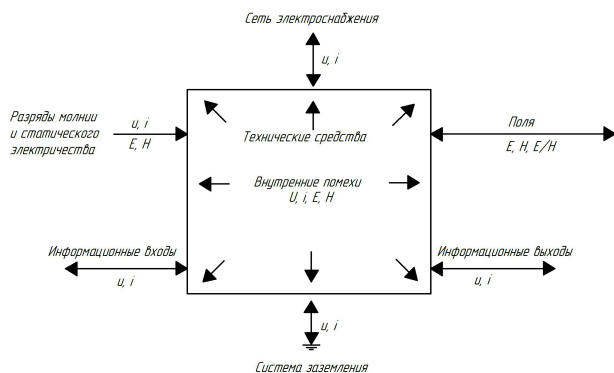


Рис. 3. Пути проникновения электромагнитных помех в техническое средство и излучения из него
Fig. 3. Routes of the electromagnetic interference penetration into technical equipment and the radiation from it

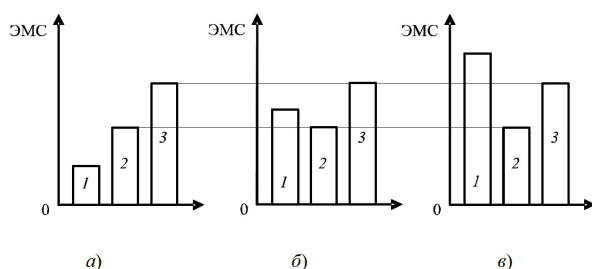


Рис. 4. Электромагнитная обстановка при различных вариантах функционирования электрооборудования:
а) нормальное функционирование технических средств;
б) нормальное функционирование технических средств может быть обеспечено, если воздействие электромагнитных помех ограничено во времени;
в) нормальное функционирование невозможно
Fig. 4. Electromagnetic conditions for various operating modes of electrical equipment:
а) normal functioning of technical equipment;
б) normal functioning of technical equipment can be ensured if the effect of electromagnetic interference is limited in time.;
в) normal functioning is impossible

распространяются по кабельным линиям или излучаются в окружающую среду.

Высоковольтный переменный ток, используемый для передачи электроэнергии на большие расстояния, создает электромагнитные поля [8], которые вызывают появление электрического тока в металлических конструкциях, кабельной продукции и в цепях управления, что приводит к появлению кондуктивных низкочастотных ЭМП электрооборудования в системе радиосвязи. Различные устройства, которые относятся к числу радиочастотных (сотовые вышки, радиопередатчики) излучают электромагнитные волны в широком диапазоне частот, которые негативно воздействуют на промышленное электрооборудование.

Природные воздействия (молнии, грозы и другие атмосферные возмущения) способны генерировать мощные помехи, которые распространяются на огромные расстояния [6]. Данные явления, хоть и кратковременные, вызывают появление напряжения и тока сверхвысокого числового значения в кабельных линиях, что приводит к выходу из строя либо к сбоям работы электрооборудования, особенно находящегося на открытом пространстве.

Факторы окружающей среды (влажность, перепады температур, электромагнитное загрязнение окружающей среды) могут усугубить проблемы,

связанные с кондуктивными низкочастотными ЭМП. Появление поверхностной электропроводности из-за наличия в воздухе влаги и пыли приводит к увеличению воздействия электромагнитных волн и к повышению уровня помех.

Реакция любого электроустройства на воздействие кондуктивных низкочастотных ЭМП зависит от его помеховосприимчивости (иначе — электромагнитной восприимчивости) и помехоустойчивости. Указанные параметры характеризуются способностью или неспособностью выполнять свои функциональные возможности при наличии кондуктивных низкочастотных ЭМП и отсутствию средств защиты.

Электромагнитную обстановку, т. е. совокупность электромагнитных явлений и (или) процессов в данной области пространства и (или) данной проводящей среде в частотном или временном диапазонах демонстрирует рис. 4.

На рис. 4 показаны уровни ЭМП (1) в точке подключения технических средств к электрической сети, помехоустойчивость технического средства (2) и помехоустойчивость (3) электрической сети в целом остаются постоянными, а уровни электромагнитных помех в сети возрастают. Случай а) характеризует нормальное функционирование технических средств; б) воздействие электромагнитных помех было кратковременным, т. е. не утратило своих функциональных возможностей; в) нормальное функционирование технических средств невозможно.

По своей природе происхождения кондуктивные низкочастотные ЭМП не представляют опасности для человека, но негативно влияют на различные элементы электроэнергетических систем. Различают множество факторов воздействия кондуктивных низкочастотных ЭМП: мощность оборудования, частота сети, расположение электрооборудования и его чувствительность. Ниже более подробно приведены потенциальные негативные последствия кондуктивных низкочастотных ЭМП для электрооборудования различных сфер производства [6]:

— снижение производительности. Помехи нарушают нормальное функционирование электрооборудования, что приводит к сбоям и полной остановке технологического процесса. Шум, гармонические искажения, вибрации в электрических машинах — все это негативно влияет на потери (электрические и экономические);

— снижение безопасности. В критически важных сферах жизнеобеспечения (больницы, поликлиники), а также в аэрокосмических системах и производствах любые негативные воздействия кондуктивных низкочастотных ЭМП приводят к случаям угрозы здоровью человека и окружающей среде. Из-за широкого использования микропроцессорной техники и датчиков информационно-измерительных систем, которые входят в состав органов управления электрооборудования, навигационного оборудования и т. д., наличие кондуктивных низкочастотных ЭМП может нарушить работу оборудования, что влечет за собой угрозу здоровью людей и целостности имущества;

— несоответствие требованиям нормативно-технической документации. Различные контролирующие органы, которые регламентируют качество электроэнергии и электромагнитную совместимость, ссылаясь на государственные стандарты, устанавливают строгие запреты на несоответствие различных показателей качества электроэнергии

требованиям стандартов. Несоблюдение этих условий может привести к юридическо-правовым санкциям, которые в дальнейшем негативно скажутся на производительности продукции и репутационных показателях предприятий. Необходимо проводить измерение показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости и предпринимать меры по снижению кондуктивных низкочастотных ЭМП на разных этапах проектирования и производственного процесса предприятий [9–11];

— финансовые потери. Последствия снижения производительности электрооборудования, снижения безопасности эксплуатации и невыполнения требований нормативно-технической документации сказываются на производственных мощностях промышленных предприятий. Выход из строя любого электрооборудования в технологическом процессе производства продукции (простой, сбой, ремонт) сказывается на его качестве и количестве. Дорогостоящий ремонт, покупка нового оборудования, установка дополнительной защиты, перепроектирование электрической сети предприятий приводят к существенным финансовым убыткам. Также не стоит забывать про косвенные расходы (репутация, юридическая ответственность), которые вносят свой вклад в денежные потери.

Методы

Существуют различные способы повышения качества электроэнергии и ЭМС:

— экранирование [12]. Используется в основном в радиоэлектронике. Правильное размещение чувствительных элементов в корпусе позволяет блокировать внешние электромагнитные поля, что исключает попадание ЭМП в электроприбор. Также использование специальных экранирующих материалов (алюминий, медь, пластмасса) снижает внешнее воздействие ЭМП. В перспективе возможно применение многофункциональных материалов, графена и углеродных нанотрубок для расширения функциональных возможностей использования данного способа;

— фильтрокомпенсирующие устройства. Применение в электрических сетях получили пассивные, активные и гибридные фильтры [13]. Принцип действия активного фильтра гармоник основан на непрерывном анализе гармонического состава нелинейной нагрузки и генерировании в распределительную сеть таких же гармоник, но с противоположной фазой. Пассивные фильтры состоят из пассивных элементов: конденсаторов, индуктивностей и/или резисторов. Для фильтрации высших гармоник тока и напряжения фильтрокомпенсирующие устройства подключаются параллельно существующей нелинейной нагрузке. Установка пассивных фильтров позволяет создать линии для протекания токов одной или нескольких гармоник, что приводит к их поглощению и препятствует их генерированию в питающую сеть. Гибридные фильтры — это новый класс силовых фильтров, сочетающих свойства силовых пассивных и активных фильтров, имеющих меньшую мощность активной части по сравнению с чисто активными фильтрами. Гибридные фильтры представляют собой комбинацию резонансного LC-фильтра и активного элемента на базе малоомощного активного фильтра. Гибридный фильтр содержит один или два резонансных контура, настроенных на наиболее значимые гармоники тока (напряжения). В большинстве схем это один контур, настроенный на 5-ю гармонику. Перспективность ис-

пользования фильтрокомпенсирующих устройств заключается в развитии алгоритмов управления, использовании сверхпроводниковых материалов и интеграции с системами хранения энергии;

— заземление [14]. Данный способ в основном направлен на снижение синфазных помех благодаря подключению контура заземления. Металлический стержень должен быть эффективно проложен, чтобы обеспечить путь наименьшего сопротивления и снизить помехи. Заземляющая полоса, которая соединяет между собой металлические стержни, позволяет выровнять разность потенциалов. Все это дает возможность эффективно бороться с синфазными помехами. Существуют разные виды заземлителей помимо металлического стержня:

1) гибкий графитовый композитный материал — неметаллический материал на основе чешуйчатого графита высокой чистоты с иерархической структурой многожильных проводов. Обладает высокой физической и химической стабильностью, устойчив к коррозии, что увеличивает срок службы заземляющих устройств;

2) углеродные композиты и нанотрубки улучшают проводимость заземляющих систем, снижая сопротивление и повышая эффективность растекания тока. Такие материалы особенно полезны в условиях высокого удельного сопротивления грунта;

3) K2M-MO3 — грунтовый наполнитель с низким удельным сопротивлением растеканию тока. Применяется в грунтах с высоким удельным сопротивлением.

Различные методы экранирования, фильтрокомпенсирующие устройства (активные, пассивные, гибридные), заземление и зануление может свести к минимуму воздействие кондуктивных низкочастотных ЭМП и обеспечить надежную и эффективную работу энергосистемы. Для более эффективного снижения уровня кондуктивных низкочастотных ЭМП возможно сочетание нескольких способов.

Внедряя эти методы снижения уровня ЭМП при проектировании, установке и эксплуатации электрических систем, инженеры и технические специалисты могут свести к минимуму воздействие кондуктивных низкочастотных ЭМП, обеспечить надежность оборудования и соответствие стандартам. Комплексное решение этой задачи оказывается целесообразным с экономической точки зрения.

По мере того как электронные устройства становятся всё более распространёнными, методы борьбы с кондуктивными низкочастотными ЭМП совершенствуются для решения данной проблемы. Существуют перспективные тенденции и методы для устранения ЭМП:

— устранять последствия кондуктивных низкочастотных ЭМП на стадии разработки. Такой способ возможен при моделировании и проектировании электрической сети. Он позволяет выявить потенциальные источники кондуктивных низкочастотных ЭМП на ранней стадии, что способствует снижению финансовых затрат [15];

— искусственный интеллект [16]. Внедрение искусственного интеллекта в прогнозирование позволяет заранее оценить влияние кондуктивных низкочастотных ЭМП. Благодаря инструментам искусственного интеллекта возможно анализировать большое количество данных об ЭМП, а также усовершенствовать стратегию по устранению кондуктивных низкочастотных ЭМП и повысить ЭМС.

Однако необходима теоретическая и практическая реализация перспективных тенденций и мето-



Рис. 5. Функциональные возможности программы
Fig. 5. Program functionality



Рис. 6. Структурная схема метода автоматизированного определения кондуктивных низкочастотных ЭМП
Fig. 6. Structural diagram of the method for the automated determination of the conductive low-frequency electromagnetic interference

дов совместно. При использовании математического аппарата теории вероятности и математической статистики созданы алгоритмы и программные обеспечения для определения кондуктивных низкочастотных ЭМП. Функциональные возможности данных программ представлены на рис. 5. Благодаря этим программам возможно производить автоматизированный расчёт параметров кондуктивных низкочастотных ЭМП: математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение и расчёт вероятности выхода значения за нормируемый предел [17–20].

Таким образом, реализация обеспечения качества электроэнергии с помощью программ для ЭВМ является основой метода автоматизированного определения кондуктивных низкочастотных ЭМП (рис. 6). Метод сводится к оригинальному способу обработки программой для ЭВМ данных, полученных в ходе измерения показателей качества

электрической энергии, что позволит научно обоснованно оценивать электромагнитную обстановку в электрических сетях и принимать необходимые эффективные технические решения для подавления кондуктивных низкочастотных ЭМП при их наличии.

Искусственный интеллект способен функционировать в ключевых направлениях электроэнергетики: мониторинг и диагностика в реальном времени, прогнозирование качества электроэнергии, оптимизация работы компенсационных устройств и т. д.

В основном применяют следующие технологии искусственного интеллекта:

- искусственные нейронные сети — для анализа многомерных данных и выявления скрытых закономерностей;
- глубокое обучение (Deep Learning) — для классификации типов искажений и прогнозирования качества электроэнергии;

— методы кластеризации (K-means, DBSCAN) — для группировки схожих режимов работы сети;

— алгоритмы временных рядов (LSTM, Prophet) — для прогнозирования нагрузки и отклонений параметров.

Интеграция технологий искусственного интеллекта в промышленные контроллеры открывает новые возможности для адаптивного и интеллектуального управления технологическими процессами и позволяет:

1) адаптировать управление под изменяющиеся условия;

2) компенсировать нелинейности объекта управления;

3) прогнозировать поведение системы;

4) обнаруживать аномалии и предсказывать отказы.

Таким образом, применение искусственного интеллекта в задачах обеспечения качества электроэнергии — это не просто технологическая модернизация, а фундаментальный переход к интеллектуальным, самообучающимся энергосистемам. При грамотной реализации такие решения способны радикально повысить надёжность, экономичность и устойчивость электроснабжения, адаптируясь к динамике современных нагрузок и условий эксплуатации. Они трансформируют подход от ручного анализа и периодических проверок к непрерывному автоматизированному управлению качеством электроэнергии в режиме реального времени.

Заключение

Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи являются следствием дисбаланса в работе электроэнергетической системы и отражают нарушение параметров качества электроэнергии. Их анализ и контроль важны для поддержания надёжности и эффективности работы оборудования, а также для обеспечения электромагнитной совместимости технических средств в сети.

Искусственный интеллект становится системообразующим элементом современной электроэнергетики, трансформируя её из статичной иерархической структуры в динамичную, самонастраивающуюся систему. Его внедрение не сводится к автоматизации отдельных процессов — оно меняет саму логику функционирования энергокомплексов и выстраивает их работу вокруг данных, прогнозов и адаптивных алгоритмов.

Список источников / References

1. Иванов М. Н., Смыков Ю. Н. Электромагнитная обстановка в электрических сетях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1-2. С. 252–255. EDN: THBWJV.

Ivanov M. N., Smykov Yu. N. Electromagnetic environment in electric networks. *Nauchnyye Problemy Transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2014;1-2:252–255. EDN: THBWJV. (In Russ.).

2. Горелов Ю. И., Кузнецова А. Д., Лыпырева П. С., Шашаева В. А. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях с резкопеременными нелинейными нагрузками // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 209–214. EDN: YTEKMX.

Gorelov Yu. I., Kuznetsova A. D., Lypyreva P. S., Shashayeva V. A. Improving the quality of electric power in electrical networks with rapidly changing nonlinear loads. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2018;12:209–214. EDN: YTEKMX. (In Russ.).

3. Васенин А. Б., Степанов С. Е., Подшивалов Е. С., Крюков О. В. Проблемы обеспечения качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2023. № 9 (170). С. 34–43. EDN: IYBDSO.

Vasenin A. B., Stepanov S. E., Podshivalov E. S., Kryukov O. V. Support problems qualities electricity in industrial power supply systems. *Avtomatizatsiya i IT v Energetike*. 2023;9(170):34–43. EDN: IYBDSO. (In Russ.).

4. Ананьина Т. В., Иванова Е. В., Переладов М. Е. [и др.]. Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи при изменении перетока мощности в сетях с глухозаземлённой нейтралью // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2024. № 1. С. 196–202. EDN: BEAGBF.

Ananina T. V., Ivanova E. V., Pereladov M. E. [et al.]. Conductive low-frequency electromagnetic interference when changing power flow in networks with a solidly grounded neutral. *Nauchnyye Problemy Transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2024;1:196–202. EDN: BEAGBF. (In Russ.).

5. Аполлонский С. М. Электромагнитная совместимость и функциональная безопасность в электроэнергетике: монография. Москва: Издательство «Русайнс», 2016. 324 с. ISBN 978-5-4365-0624-1. <https://doi.org/10.15216/978-5-4365-0624-1>. EDN: VQOWSX.

Apollonskiy S. M. *Elektromagnitnaya sovmestimost' i funktsional'naya bezopasnost' v elektroenergetike*. Moscow, 2016. 324 p. ISBN 978-5-4365-0624-1. <https://doi.org/10.15216/978-5-4365-0624-1>. EDN: VQOWSX. (In Russ.).

6. Цицикян Г. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: монография. Санкт-Петербург: ЭЛМОР, 2007. 182 с. ISBN 5-7399-0141-3. EDN: QMJWJV.

Tsitsikyan G. N. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike*. Saint Petersburg, 2007. 182 p. ISBN 5-7399-0141-3. EDN: QMJWJV. (In Russ.).

7. Шабалина Н. А. Электромагнитные помехи в промышленности: принципы возникновения и влияние на электронное оборудование // Инновации в науке. 2012. № 13-1. С. 103–109. EDN: PENTZX.

Shabalina N. A. Industrial electromagnetic interference: origin and impact on electronic equipment. *Innovatsii v Nauke*. 2012;13-1:103–109. EDN: PENTZX. (In Russ.).

8. Смыков Ю. Н. Аспекты повышения качества электрической энергии в автономных системах электроснабжения // Промышленная энергетика. 2022. № 11. С. 17–23. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.64.78.003>. EDN: XQHTFX.

Smykov Yu. N. Issues of improving the quality of electric energy in autonomous power supply systems. *Promyshlennaya Energetika*. 2022;11:17–23. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.64.78.003>. EDN: XQHTFX. (In Russ.).

9. Кузнецов А. В., Чикин В. В. Оценка стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества в системах электроснабжения // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 2 (22). С. 90–100. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_2_90. EDN: HYGMYT.

Kuznetsov A. V., Chikin V. V. Assessment of cost of harmful effects of transmission and consumption of electricity of reduced quality in power supply systems. *Smart Electrical Engineering*. 2023;2(22):90–100. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_2_90. EDN: HYGMYT. (In Russ.).

10. Петров А. Р., Грачева Е. И. Разработка методики оценки потерь электроэнергии в промышленных сетях электроснабжения // Вестник ПИТТУ имени академика М. С. Осими. 2024. № 4(33). С. 48–56. EDN: PWCJGT.

Petrov A. R., Gracheva E. I. Development of a methodology for assessing electricity losses in industrial power supply networks. *Bulletin of PITTU*. 2024;4(33):48–56. EDN: PWCJGT. (In Russ.).

11. Большаков О., Воронин В., Шамонов Р., Тульский В. Подходы к обеспечению нормативного качества электроэнергии // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 1 (22). С. 48–51. EDN: TXUPHP.

- Bolshakov O., Voronin V., Shamonov R., Tulskey V. Approaches to ensuring the regulatory quality of electricity. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2014;1(22):48–51. EDN: TXUPHP. (In Russ.).
12. Калашникова О. П., Петров П. Э., Андреев П. Г. [и др.]. Экранирование как метод обеспечения электромагнитной совместимости // Современные информационные технологии. 2019. № 29. С. 133–139. EDN: NZFXLC.
- Kalashnikova O. P., Petrov P. E., Andreev P. G. [et al.]. Shielding as method of ensuring electromagnetic compatibility. *Contemporary Information Technologies*. 2019;29:133–139. EDN: NZFXLC. (In Russ.).
13. Платонова Е. В., Коловский А. В., Торопов А. С., Метелев В. А. Применение фильтрокомпенсирующих устройств для повышения качества напряжения угольных разрезов // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 8 (134). С. 9. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.35>. EDN: TNBOZC.
- Platonova Y. V., Kolovskii A. V., Toropov A. S., Metele V. A. Application of filter compensating devices to improve voltage quality at coal mines. *International Research Journal*. 2023;8(134):9. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.35>. EDN: TNBOZC. (In Russ.).
14. Скворцов В. Заземление и экранирование как способы обеспечения электромагнитной совместимости электронных устройств // Силовая электроника. 2020. № 2 (83). С. 52–59. EDN: EZJDPV.
- Skvortsov V. Zazemleniye i ekranirovaniye kak sposoby obespecheniya elektromagnitnoy sovmestimosti elektronnykh ustroystv. *Silovaya Elektronika*. 2020;2(83):52–59. EDN: EZJDPV. (In Russ.).
15. Куликов О. Е., Шалумов А. С. Обеспечение электромагнитной совместимости на ранних стадиях проектирования радиоэлектронной аппаратуры: средства и методы реализации // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 1. С. 12–18. EDN: NTMIOD.
- Kulikov O. E., Shalumov A. S. Electromagnetic compatibility in early stages of design of electronic equipment: means and methods of implementation. *Achievements of Modern Radioelectronics*. 2011;1:12–18. EDN: NTMIOD. (In Russ.).
16. Ромашенко М. А., Васильченко Д. В., Белецкая С. Ю. Использование искусственных нейронных сетей для оценки воздействия электромагнитных помех // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 8. С. 21–27. EDN: OVTIGB.
- Romashchenko M. A., Vasilchenko D. V., Beletskaya S. Yu. Use of artificial neural networks to assess the impact of electromagnetic interference. *Radio Engineering*. 2023;87(8):21–27. EDN: OVTIGB. (In Russ.).
17. Руди Д. Ю., Вишнягов М. Г., Руппель А. А. Компьютерная программа для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 65–78. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78>. EDN: ITCMBE.
- Rudi D. Yu., Vishnyagov M. G., Ruppel A. A. Computer program for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference by the coefficient of the nth harmonic component of the voltage. *The International Technical-Economic Journal*. 2021;1:65–78. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78>. EDN: ITCMBE. (In Russ.).
18. Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А. [и др.]. Моделирование несимметричных режимов работы электрической сети и обработка результатов с помощью программы для ЭВМ // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 48–54. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-158-48-54>. EDN: XMRQFN.
- Antonov A. I., Denchik Yu. M., Zubanov D. A. [et al.]. Simulation of asymmetric modes of operation of electrical network and processing of results using computer program. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018;2(158):48–54. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-158-48-54>. EDN: XMRQFN. (In Russ.).
19. Котова Н. В., Власьевский С. В., Малышева О. А. Виртуальный прибор для измерения расхода и показателей качества электроэнергии электровозов переменного тока // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2020. № 3 (24). С. 56–58. EDN: OKYRJB.
- Kotova N. V., Vlas'evskiy S. V., Malysheva O. A. Virtual instrument for measuring the flow rate and quality indicators of ac electric locomotives. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo Regiona*. 2020;3(24):56–58. EDN: OKYRJB. (In Russ.).
20. Губская Е. И. Решение задач электромагнитной совместимости специализированными программными средствами // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 68–78. <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2022.13.3.007>. EDN: QHWSFN.
- Gubskaya E. I. Solving the problems of electromagnetic compatibility by using specialized software. *Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences*. 2022;13(3):68–78. <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2022.13.3.007>. EDN: QHWSFN. (In Russ.).
-
- Вклад авторов:**
- К. С. Мочалин.** Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, формулирование выводов.
- Ю. М. Денчик.** Проведение обзора литературы на тему исследования и анализ проведенных результатов.
- А. И. Антонов.** Проведение обзора литературы и анализ проведенных результатов.
- Д. Ю. Руди.** Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, оценка результатов исследований, формулирование выводов, подготовка текста статьи.
- А. А. Руппель.** Проведение обзора литературы и анализ проведенных результатов.
-
- Authors' contribution:**
- Konstantin S. Mochalin.** Setting the research aim and objectives, analysing the state of the issue, formulating conclusions.
- Yuliya M. Denchik.** Conducting a literature review and analysing the results.
- Aleksandr I. Antonov.** Conducting a literature review and analysing the results.
- Dmitriy Yu. Rudi.** Setting the research aim and objectives, analysing the state of the issue, evaluating research results, formulating conclusions, preparing the text of the article.
- Aleksandr A. Ruppel'.** Conducting a literature review and analysing the results.
-
- Информация об авторах:**
- МОЧАЛИН Константин Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, ректор Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Новосибирск.
SPIN-код: 9418-7320
AuthorID (РИНЦ): 564384
e-mail: nsawt_ese@mail.ru
- ДЕНЧИК Юлия Михайловна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Новосибирск.
e-mail: nsawt_ese@mail.ru
- АНТОНОВ Александр Игоревич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водно-

го транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта, ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 5682-8929

AuthorID (РИНЦ): 842787

e-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru

РУДИ Дмитрий Юрьевич, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 5222-7906

AuthorID (РИНЦ): 830094

e-mail: dima_rudi@mail.ru

РУППЕЛЬ Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование», ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 3386-9834

AuthorID (РИНЦ): 423886

e-mail: elektrotex@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; одобрена после рецензирования 09.03.2026; принята к публикации 03.06.2026.

Information about the authors:

МОЧАЛИН Konstantin Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Rector, Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk.

SPIN-code: 9418-7320

AuthorID (RSCI): 564384

e-mail: nsawt_ese@mail.ru

DENCHIK Yuliya Mikhaylovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electric

Power Systems and Electrical Engineering Department, Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk.

e-mail: nsawt_ese@mail.ru

ANTONOV Aleksandr Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Omsk Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport, Omsk.

SPIN-code: 5682-8929

AuthorID (RSCI): 842787

e-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru

RUDI Dmitriy Yur'yevich, Senior Lecturer of the Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Omsk Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport, Omsk.

SPIN-code: 5222-7906

AuthorID (RSCI): 830094

e-mail: dima_rudi@mail.ru

RUPPEL' Aleksandr Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Omsk Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport, Omsk.

SPIN-code: 3386-9834

AuthorID (RSCI): 423886

e-mail: elektrotex@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 04.02.2026; approved after reviewing 09.03.2026; accepted for publication 03.06.2026.

КРИТЕРИИ ПРИМЕНЕНИЯ РОТОРА В ИНТЕГРИРОВАННОМ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРЕ

М. В. Охотников✉, Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов

Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

✉ oxothukob@mail.ru

Основанием для развития авиационной отрасли является непрерывный процесс изменения конструкций, характера работы и условий эксплуатации применяемых электромеханических преобразователей энергии. Дополнительным фактором, подталкивающим к развитию, является расширение за рубежом тренда на гибридные силовые установки, что позволяет повысить уровень электрификации летательного аппарата и сделать очередной шаг к созданию "более электрического самолета". Одним из таких шагов является интеграция электромеханических преобразователей энергии в виде стартер-генератора в авиационный двигатель, что позволит достичь большей компактности, унификации технологий, разрабатываемых при его внедрении, и говорить о повышении уровня прочности элементов интегрируемого преобразователя.

В работе рассматриваются особенности подходов при разработке и изготовлении ротора, стартер-генератора для авиационного двигателя; анализируются конструкция ротора, интегрированного стартер-генератора, а также материалы, входящие в его состав. Приведены расчетные данные нагрузки бандажа и магнитов ротора при его работе. Рассмотрены результаты разгонных испытаний роторов с постоянными магнитами.

Целью проводимых исследований является оценка возможности применения композитного бандажа для интегрированного стартер-генератора, а также анализ возможных повреждений бандажа и постоянных магнитов, используемых в конструкции ротора. В результате проведенных работ получены расчетные и экспериментальные данные, указывающие на возможность применения композитного бандажа для роторов с частотой вращения до 40 000 об/мин; приведен алгоритм оценки запаса прочности, а также проведена экспериментальная апробация исследований. Полученные в результате эксперимента данные показывают возможные дефекты бандажа и магнитов, что позволяет установить технологические причины их возникновения и предотвратить их дальнейшее повторение.

Ключевые слова: интегрированный стартер-генератор, бандаж ротора, балансировка ротора, прочность ротора, магнит, испытательный стенд, оснастка

Для цитирования: Охотников М. В., Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е. Критерии применения ротора в интегрированном стартер-генераторе. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 88–95. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-88-95>. EDN: LIDUOK.



© Охотников М. В., Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

CRITERIA OF USING A ROTOR IN AN INTEGRATED STARTER-GENERATOR

М. V. Okhotnikov✉, F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov

Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi St., 32, Ufa, 450076, Russia

✉ oxothukob@mail.ru

The basis for the development of the aviation industry is the continuous process of changing the designs, Type of operation and operating conditions of the applied electromechanical energy converters. An additional factor is the expansion of the trend for hybrid power plants abroad, which allows increasing the level of electrification of the aircraft and providing another step towards creating a "more electric aircraft". One of these steps is the integration of electromechanical energy converters in the form of a starter generator into

an aircraft engine, which allows providing greater compactness, unification of technologies and increasing the strength of the elements of the integrated converter.

This paper examines approaches to the development and manufacture of rotors and starter-generators for aircraft engines. The authors analyse the design of the rotor, integrated starter-generator and the materials; present calculated load data for the rotor shroud and magnets during operation and review the results of acceleration tests of rotors with permanent magnets.

The aim of the research is to evaluate the feasibility of using a composite bandage for an integrated starter-generator, as well as to analyse the potential damage to the bandage and permanent magnets used in the rotor design. The research demonstrates calculated and experimental data indicating the feasibility of using the composite bandage for rotors with rotational speeds of up to 40.000 rpm. Moreover, the authors develop an algorithm for estimating the safety margin and conduct an experimental testing. The results highlight potential defects in the bandage and magnets, identifying the underlying causes and preventing their recurrence.

Keywords: integrated starter-generator, rotor bandage, rotor balancing, rotor strength, magnet, test stand, tooling

For citation: Okhotnikov M. V., Ismagilov F. R., Vavilov V. E. Criteria of using a rotor in an integrated starter-generator. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):88–95. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-88-95>. EDN: LIDUOK. (In Russ.).



© Okhotnikov M. V., Ismagilov F. R., Vavilov V. E., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Актуальность развития авиационных систем в России, направленная на создание «более электрического самолета» [1, 2], провоцирующая введение кардинально новых подходов при разработке электромеханических преобразователей энергии, подтверждается государственной программой Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности», утверждённой постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 303, и транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г., утверждённой распоряжением № 3363-р Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г.¹.

Развитие авиационной промышленности оказывает мультипликативный эффект на развитие всей российской экономики в целом, создавая предпосылки для повышения эффективности целого ряда смежных отраслей (станкостроение, металлообработка, производство конструкционных материалов и химических веществ, радиоэлектроники и т. д.). Кроме того, трансфер создаваемых в отрасли технологий способствует разработке и применению новых технологических решений в автомобильной промышленности, судостроении, энергетике, ракетно-космической промышленности. Так, процесс разработки интегрированного электромеханического преобразователя энергии потребует привлечения различных отраслей промышленности с одновременным расширением требований к технологии и производству.

Постановка задачи

Одним из основных элементов интегрированно-го стартер-генератора (ИСТГ) является ротор, которому предстоит работать в достаточно сложных и агрессивных условиях в отличие от статора, для

которого есть техническая возможность реализовать принудительное жидкостное охлаждение [3]. Основная сложность при эксплуатации ИСТГ будет заключаться в отсутствии возможности его технического осмотра, обслуживания и оперативной замены, что накладывает на его элементы достаточно высокие требования по прочности в части работоспособности при значительных механических нагрузках в агрессивной среде, характеризующейся наличием масла и высокой окружающей температуры. Так, температура вокруг ИСТГ в камере компрессора высокого давления авиационного двигателя (АД), к примеру, для ПС-90 может достигать 180 °С и определяться конструктивом и характером работы АД, масло при этом, поступая от опор АД, находится в состоянии тумана [4–7].

Варианты решения

Для примера рассмотрим облегченную конструкцию ротора ИСТГ (рис. 1), представляющую цельную ступицу 2, имеющую зацепление с валом 1 АД через шлицевое соединение, а на её поверхности располагаются сегментированные постоянные магниты 3, удерживаемые за счет внешнего бандажа 4, имеющего предварительное натяжение. Облегченность конструкции поясняется отсутствием дополнительных элементов, требуемых при технологической проработке внедряемого изделия, таких как вентилятор, торцевые кольца, ловители и пр.

В качестве материала ступицы можно использовать титан типа BT-22 либо его аналоги, характеризующиеся высокой прочностью и относительной лёгкостью. Магниты, исходя из температурных особенностей [4, 5] в области размещения ИСТГ, лучше выбрать KC25Al, а бандаж можно выполнить из углеволокна UMT530-12K-EP в паре со связующим веществом XT-187 либо SB332 (данные материалы характеризуются высокой температурной

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 № 303 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы". URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201404240025?index=79&rangeSize=20> (дата обращения: 01.12.2025).

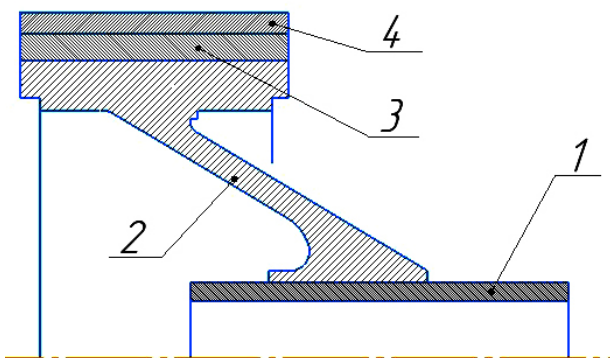


Рис. 1. Ротор интегрированного стартер-генератора
Fig. 1. Rotor of the integrated starter-generator
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

стойкостью и продолжительной работой при температуре до 180 и до 250 °C соответственно)² [8]. Упрощенное исполнение конструкции ротора способствует повышению его прочности и малому количеству вариантов возможных неисправностей данного ротора при эксплуатации ИСТГ, среди которых могут быть: дефект ступицы и ее соединения с валом АД, разбалансировка ротора, снижение параметров магнитов и нарушение целостности бандажа. Оценить прочность элементов ротора можно согласно обобщенному уравнению [9].

$$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 v_1^2 + v_p^2}},$$

где n — коэффициент запаса прочности в зависимости от средних значений предела текучести σ_1 и напряжения $\sigma_{\text{экв}}$; v_1 — коэффициент вариации предела текучести; v_p — коэффициент вариации давления.

$$n = \frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{экв}}}.$$

Как правило, дефект цельной ступицы при прочностном анализе конструкции, предусмотренной в конструкторской документации, показывающий коэффициент запаса прочности не ниже 2х, может быть обусловлен нарушением ее геометрии и означать просчеты в конструктиве при разработке основной компоновки ИСТГ, так как температура в 180 °C и масляная среда не могут привести к возникновению её конструктивных изменений при выполнении из ВТ-22. Материал для бандажа выбирается исходя из предельной окружающей температуры в 180 °C и температуры самой машины [4], которую способно выдерживать связующее вещество. Углеродистый бандаж в данном случае представляет цилиндрическую оболочку, выполненную путем намотки углеродистой нити УМТ530-12К-ЕР, пропитанной связующим ХТ-187, допускающим работу при температурах до 180 °C³. Таким образом, при электромагнитном и тепловом расчетах ИСТГ необходимо учитывать максимально

возможную температуру на поверхности бандажа ротора в 180 °C, которую будут определять потери на трение бандажа о воздух в воздушном зазоре, потери в постоянных магнитах и температура внешней среды [10]. Прочность элементов ротора, характеризующаяся пределом текучести, коэффициентами вариации давления и запаса прочности при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возникал, с соблюдением технологичности выполнения ступицы и соблюдения температурных условий при эксплуатации магнитов будет иметь значения более 1. Критический вопрос по определению прочности остается только к бандажу ротора.

Для проверки прочности бандажа проектируемого ротора ИСТГ спроектирован испытательный ротор с максимальным диаметром по бандажу в 107 мм, диаметром по магнитам в 94 мм, диаметром ступицы ротора в 70 мм, количество полюсов — 6; магниты выполняются цельными, не шихтованными. Для компенсации разности сил, создаваемых в бандаже испытательного ротора, имеющего меньший диаметр по сравнению с проектируемым для ИСТГ на этапе испытаний, потребуются раскручивать испытательный ротор с большей скоростью.

Линейные размеры самого ИСТГ, как можно судить из конструктива камеры компрессора высокого давления АД, значительно ограничены [3] свободным пространством. Малая длина активной части ИСТГ при условии увеличения его мощности потребует повышения частоты вращения, что достаточно затруднительно при непосредственной посадке ротора на вал АД. Следовательно, остается увеличение диаметров ротора и самого ИСТГ. При увеличении диаметра вращающихся частей значительно растет значение механических напряжений в бандаже и, соответственно, возрастает толщина бандажной оболочки ротора. Следовательно, падает величина индукции в воздушном зазоре, а также возрастают потери, связанные с трением ротора о воздух в воздушном зазоре.

Величина бандажной оболочки на испытательном роторе, равная 6,5 мм, совместно с воздушным зазором в 0,4 мм напрямую будет определять величину магнитной индукции и магнитного потока в зазоре.

$$B_\delta = \frac{\Phi_{\delta 0}}{a_i \tau l_i},$$

где B_δ — индукция в воздушном зазоре в области бандажа (Тл); $\Phi_{\delta 0}$ — поток в зазоре; τ — полюсное деление по диаметру ротора; a_i — расчетный коэффициент полюсного перекрытия; l_i — длина воздушного зазора.

В силу суммарного воздушного зазора потери в этой области становятся существенными. Высокие аэродинамические потери могут привести к увеличению температуры постоянных магнитов и падению их характеристик, что недопустимо и занесено анализируется на тепловом расчете.

С учетом этих данных выгоднее выполнять бандаж наименьшей толщины. Снизить толщину позволяет бандаж с более высоким пределом проч-

² ТУ 2257-665-11131395-2009. Композиция эпоксидная антикоррозионная марки ХТ-187. <https://e-ecolog.ru/crc/78.22.61.000.T.000012.03.10?ysclid=mq8s31bfvt490887211> (дата обращения: 01.12.2025).

³ Там же (дата обращения: 01.12.2025).

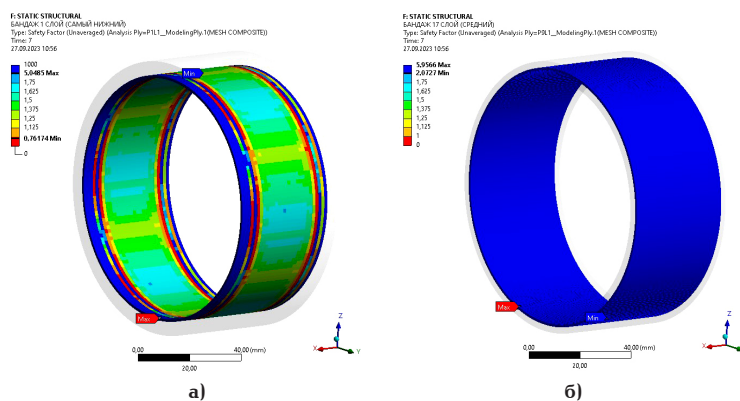


Рис. 2. Анализ прочности бандажа ротора:

а) давление на первые слои бандажа; б) итоговое давление на весь бандаж

Fig. 2. Analysis of the rotor bandage strength:

а) pressure on the first layers of the bandage;

б) total pressure on the entire bandage

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

ности. Следовательно, возникает необходимость зависимого, в первую очередь аналитического расчета электромагнитных параметров, определяемых исходным заданием над проектированием тепловых процессов, зависящих от условий эксплуатации и прочностных показателей бандажа ротора (рис. 2).

Прочность бандажной оболочки сохраняется и обеспечивается пятикратный коэффициент запаса по прочности (рис. 2б). В то же время первые слои данного бандажа подвергаются наибольшей нагрузке (рис. 2а), и, следовательно, необходимо проведение детального анализа и исследований характера возможных повреждений данных слоев [11]. Учитывая взаимное влияние приведенных факторов, а именно толщины бандажа на величину магнитной индукции (2), стоит провести отдельное исследование влияния бандажа в рассматриваемых условиях на распределение магнитного потока.

Для объективной оценки конструктивных возможностей проектируемого ИСТГ в прочностной расчет рассматриваемого преобразователя и в разрабатываемую конструкторскую документацию необходимо закладывать конкретные параметры бандажа и требования по их достижению. Сам процесс намотки бандажа на ротор состоит из нескольких этапов, которые помимо подготовительных операций включают требования соблюдения одинаковых условий на всем этапе намотки углеволоконной нити, равномерности ее пропитки, поддержание постоянной температуры как ротора, так и самого волокна со связующим, а также соблюдение условий при его отверждении в печи. Исходя из условий изготовления бандажа и условий конкретного изготовления и соблюдения технологии следует, что его параметры определяются индивидуально. Таким образом, для верификации расчетных данных требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Целью данных исследований является проверка на прочность бандажа ротора, проектируемого ИСТГ с постоянными магнитами. Испытания проводились по сокращенной программе и методике испытаний (ПМИ), направленной на определение прочности бандажа. Оснастка для разгонных испытаний бандажа (ротор) рассчитывается на статическую прочность для обеспечения ее работоспособности во всем диапазоне частот вращения



Рис. 3. Процесс намотки углеволоконного бандажа ротора

Fig. 3. Carbon fiber rotor band winding process

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

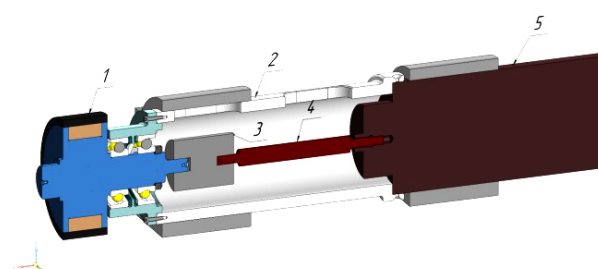


Рис. 4. Общий вид испытательного стенда

Fig. 4. General view of the test stand

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

по предусмотренному КД. Магниты приклеиваются к оснastке на клей Ана term-105. Углеволоконный бандаж в данном случае представляет цилиндрическую оболочку, выполненную путем намотки углеволоконной нити UMT530-12K-EP, пропитанной связующим ХТ-187 (рис. 3). При этом происходит приклеивание бандажа к внешней поверхности магнитов [12].

Бандаж испытывается на стенде (рис. 4). Стенд состоит из оснastки испытательной 1, корпуса 2, муфты компенсационной 3, вала шпинделя 4 и шпинделя 5. Исполнение вала шпинделя 4 игра-

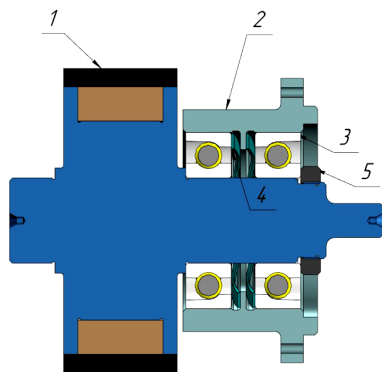


Рис. 5. Общий вид испытательной оснастки
Fig. 5. General view of the test equipment
Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

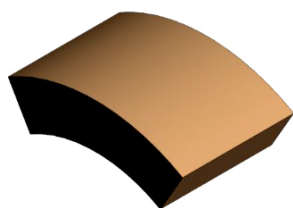


Рис. 6. Имитатор
сегментированного
постоянного магнита
эквивалентной массы
и габаритов
Fig. 6. Simulator of a
segmented permanent magnet
of equivalent mass and
dimensions
Источник / Source:
разработано авторами /
compiled by the authors

ет роль защитного слабого звена на случай непредвиденных обстоятельств, а ее форма обусловлена производственной необходимостью. Ротор испытательной оснастки приводится во вращение от высокоскоростного шпинделя 5 через вал 4 и компенсационную муфту 3. Фиксация корпуса оснастки относительно шпинделя 5 осуществляется за счет корпуса 2.

Испытательная оснастка (рис. 5) в данном случае спроектирована исходя из условий технологичности и, в свою очередь, состоит из испытательного ротора 1, корпуса 2, двух радиально-упорных подшипников 3, пружинных колец 4 и центральной стягивающей гайки 5.

Нагрузка на бандаж, сопротивление которого будет проверяться в ходе испытаний, будет создаваться за счет сегментированных постоянных магнитов (рис. 6), которые под действием центробежных сил будут стремиться растянуть бандаж изнутри, как это следует из результатов моделирования (рис. 2а).

Усилие, с которым магниты будут давить на бандаж, можно рассчитать, как

$$F_{ц} = \frac{mv^2}{R},$$

где $F_{ц}$ — центробежная сила (Н); m — масса магнита (кг); v — скорость движения (м/с); R — радиус ротора (м).

На бандаж будет оказываться усилие, равное 920 МПа на каждом полюсе.

Запас прочности можно оценить по пределу текучести:

$$k_{\sigma_T} = \frac{\sigma_T}{\sigma_A},$$

где σ_T — предел текучести материала; σ_A — действующие напряжения $k_{\sigma_T} = 1,4...2$ нормативное значение коэффициента запаса по пределу текучести.

Предел текучести бандажа из углеволокна, согласно расчетам, будет составлять 1050 МПа.

В качестве критерия оценки прочности однонаправленного слоя при послойном анализе прочности используется критерий Хилла:

$$H_{cr} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1 \sigma_2} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{1,2}}{\tau_{1,2}} \right)^2 = 1,$$

где σ_1 , σ_2 и $\tau_{1,2}$ — предельные напряжения в слое в направлении параллельно и перпендикулярно волокнам и при сдвиге в плоскости слоя соответственно.

Для оценки прочности композитов используются коэффициент запаса прочности RF , показывающий, во сколько раз допускаемые напряжения превышают действующие, и обратный коэффициент запаса прочности IRF , показывающий во сколько раз действующие напряжения меньше допускаемых.

$$RF = \frac{1}{\sqrt{H_{cr}}},$$

$$IRF = \sqrt{H_{cr}}.$$

В обоих случаях разрушение имеет место при $RF = 1$ или $IRF = 1$.

Допускаемый коэффициент запаса прочности для композитных конструкций по критерию Тсаи — Хилла [13]:

$$2 \leq [RF] \leq 3 \text{ или } 0 \leq [IRF] \leq 1.$$

В данном расчете принимается, что $[RF] \geq 1,4$.

Условный предел текучести с допуском на величину пластической деформации при нагрузке на бандаж будет означать величину наименьшего напряжения, при котором бандаж деформируется без заметного увеличения растягивающего усилия⁴. Если на эксперименте используются стальные имитаторы магнитов, а не реальные магниты, стоит учитывать и компенсировать их разность в весе вследствие различной плотности материала.

Сам образец ротора испытательной оснастки с намотанным бандажом показан на рис. 7.

Для объективности и исключения влияния дополнительных внешних факторов испытательный ротор, по аналогии с проектируемым ротором, при необходимости должен подвергаться шлифовке бандажа (для выравнивания поверхности,

⁴ ГОСТ 1497—84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 01.01.1986 г. Москва: Издательство стандартов, 1997.



Рис. 7. Ротор испытательной оснастки с намотанным бандажом

Fig. 7. Test rig rotor with wound bandage

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

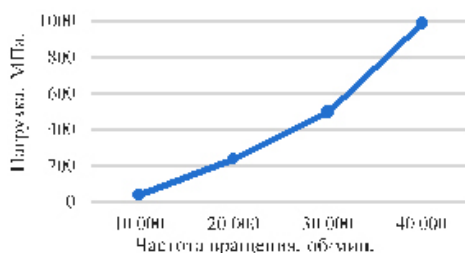


Рис. 8. Характеристика усилий в бандаже

Fig. 8. Bandage force features

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

снятия излишек материала, приведения внешнего диаметра в соответствие с КД) и балансироваться по ГОСТ ИСО 1940—1—2007⁵. Для повышения надежности балансировку нужно производить по классу точности балансировки G0,4.

Согласно разработанному ПМИ, при испытаниях ротора производится ступенчатое, по 10 000 об/мин, увеличение частоты вращения от 0 до 40 000 об/мин с остановкой на каждом этапе на 3 мин. Величина частоты вращения принималась исходя из анализа частот вращения валов АД от разных производителей и выбиралась максимальной для оценки возможности применения роторов данного типа при проектировании не только ИСТГ для АД, но и для гибридной силовой установки. Усредненная характеристика усилий в бандаже при испытаниях приведена на рис. 8.

Как видно из рис. 8, величина нагрузки возрастает при повышении частоты вращения до 920 МПа, что создается за счет собственной массы бандаж и магнитов. Характеристика не превышает предельно расчетного значения, что подтверждается успешным результатом испытаний, при котором целостность бандаж сохранилась.

В результате удачного завершения испытаний, поверхность бандаж должна сохранять свою однородность и не иметь следов повреждения бандаж. В ином случае, если не произошло непосредствен-

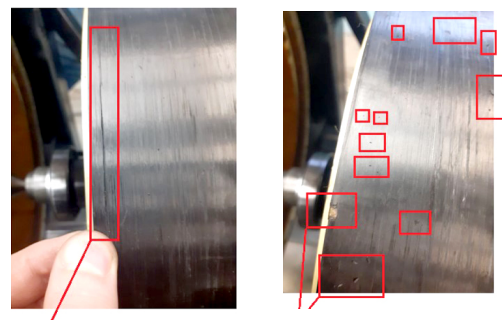


Рис. 9. Дефекты бандаж:

а) расслоение бандаж; б) разрыв волокон

Fig. 9. Bandage defects:

а) delamination of the bandage; б) fiber rupture

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

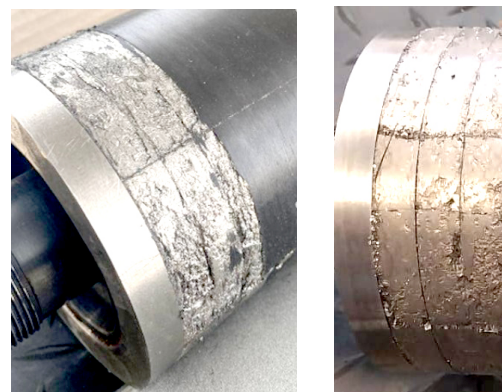


Рис. 10. Характер повреждения магнитов ротора:

а) повреждения магнитов, приклеенных к ротору; б) повреждения магнитов, не приклеенных к ротору

Fig. 10. Type of the damage of the rotor magnets:

а) damage of magnets glued to the rotor; б) damage of magnets not glued to the rotor

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

ного разрушения бандаж, возможно наблюдать наличие следующих дефектов бандаж ротора, характеризующихся расслоением бандаж (рис. 9а), что может говорить о нарушении технологического процесса намотки бандаж с мелкими дефектами отслоения, а также местным разрывом волокон (рис. 9б), указывая на начинающийся процесс разрушения бандаж [14, 15].

Это означает, что бандаж выдержал кратковременный ресурс, определенный ПМИ, но, вероятно, начался динамический процесс деградации бандажной оболочки, что необходимо исследовать отдельно.

На рис. 10а показан характер повреждения магнитов под бандажом, наблюдаемый после среза бандаж и снятия углеволоконного бандаж с постоянных магнитов, произошедших вследствие отслоения верхнего слоя магнитов; магниты при этом оставались приклеенными к ротору. Характер данных повреждений подтверждается результатами высокой механической напряженности,

⁵ SO 21940-11:2016. Mechanical vibration — Rotor balancing. Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behavior.

которую оказывают магниты на первые слои бандажа. Это может говорить о подвижности бандажа при испытаниях либо движении магнитов [15]. На рис. 10б показан характер повреждения магнитов при аналогичных условиях, но в данном случае магниты на ротор не были приклеены.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать заключение о возможности применения углеволоконного бандажа при учете прочих внешних факторов для роторов высокоскоростных интегрированных стартер-генераторов и гибридных силовых установок. В то же время стоит учитывать конструктивные особенности проектируемых электро-механических преобразователей энергии и максимальные механические напряженности в полости бандажа.

По результатам разгонных испытаний испытательного ротора было определено, что бандаж, выполненный из UMT530-12K-EP и XT-187 толщиной 6,5 мм, выдержал нагрузки в 900 МПа, определенные по ПМИ, и может использоваться в конструкции проектируемых изделий. Необходимо учитывать требуемый запас прочности. В данном случае он составлял 1,4, что важно для определения состояния магнитов по итогу испытаний. Характер возможных повреждений магнитов под бандажом, проявляющийся после испытаний, может оказать влияние на картину поля. Учитывая, что бандаж ротора при приведенных условиях занимает 96 % суммарного воздушного зазора ИСТГ между полюсом статора и магнитом ротора и магнитная проницаемость углеволоконного бандажа отличается от воздуха, следует провести отдельное исследование по распределению магнитного потока в суммарном воздушном зазоре ИСТГ и его влиянии на величину индукции.

Финансирование / Funding

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-29-00675 «Разработка фундаментальных научных основ высокоэффективного электро-механического преобразователя энергии с повышенными удельными характеристиками и элементов гибридной силовой установки».

The research was carried out with the support of the Russian Science Foundation as part of the scientific project No. 24-29-00675 "Development of the fundamental scientific basis for a high-efficiency electromechanical energy converter with improved specific characteristics and elements of a hybrid power plant".

Список источников / References

1. Garcia J. R., Ortega J. A., Aldabas E., Romeral L. Moving Towards a More Electric Aircraft. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2007;22(3):3–9. <https://doi.org/10.1109/MAES.2007.340500>.
2. Greenwood E., Brentner K., Rau R., Ted Gan Z. F. Challenges and opportunities for low noise electric aircraft // *International Journal of Aeroacoustics*. 2022;21(5-7):1–67. <https://doi.org/10.1177/1475472X221107377>.
3. Охотников М. В. Концепция разработки и внедрения интегрированного авиационного генератора с внешним ротором // *Электротехника*. 2024. № 12. С. 48–53. <https://doi.org/10.53891/00135860-2024-12-48-53>. EDN: FTDKUX.

Okhotnikov M. V. The concept of developing and implementing an integrated aircraft generator with an external rotor. *Elektrotehnika*. 2024;12:48–53. <https://doi.org/10.53891/00135860-2024-12-48-53>. EDN: FTDKUX. (In Russ.).

4. Дубровский В. А., Каблов Е. Н., Герасимов В. В. Испытание и исследование монокристалльных лопаток I ступени турбины двигателя ПС-90А // *Авиационная промышленность*. 1994. № 9-10. С. 11–15. EDN: ZPYXLV.

Dubrovsky V. A., Kablov E. N., Gerasimov V. V. Testing and investigation of the first stage rotor monocrystalline blades for ПС-90А turbine engine. *Aviatsionnaya Promyshlennost'*. 1994;9-10:11–15. EDN: ZPYXLV. (In Russ.).

5. Gieras J. F. Permanent magnet motor technology: design and applications. CRC Press, 2010. 612 p.

6. Вавилов В. Е., Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Каримов Р. Д. Высокотемпературные электро-механические преобразователи энергии с возможностью интеграции в авиационный двигатель. Перспективы и проблемы создания // *Авиакосмическое приборостроение*. 2015. № 9. С. 48–56. EDN: UJXBGF.

Vavilov V. E., Ismagilov F. R., Khayrullin I. Kh., Karimov R. D. High temperature electromechanical energy converters that can be integrated in to aircraft engine. Prospects and design problems. *Aerospace Instrument-Making*. 2015;9:48–56. EDN: UJXBGF. (In Russ.).

7. Rjckard R. Sectnde, Robert P. Macosko, David S. Repas Integrate Enginegenerator concept for aircraft electric secondary power national aeronautics and space administration // Washington, D. C., June 1972, NASATM X2579, pp 22.

8. Daniel I. M., Ishai O. Engineering Mechanics of Composite Materials. Oxford University Press, 2006. 462 p. ISBN 978-0-19-515097-1.

9. Труханов В. М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытаний опытных образцов. Москва: Машиностроение. 2003. 320 с.

Trukhanov V. M. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem tipa podviznykh ustanovok na etape proyektirovaniya i ispytaniy opytnykh obratsov. Moscow, 2003. 320 p. (In Russ.).

10. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D. [et al.]. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009;56(3):871–882. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2011622>.

11. Du G., Xu W., Zhu J., Huang N. Rotor Stress Analysis for High Speed Permanent Magnet Machines Considering Assembly Gap and Temperature Gradient. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2019;34(4):2276–2285. <https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2939220>.

12. Jaatinen P. Design and control of a permanent magnet bearingless machine. Lappeenranta, 2019. 73 p.

13. Гриневич Д. В., Яковлев Н. О., Славин А. В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). С. 92–111. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111>. EDN: KENLSM.

Grinevich D. V., Yakovlev N. O., Slavin A. V. The criteria of the failure of polymer matrix composites (review). *Trudy VIAM*. 2019;7(79):92–111. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111>. EDN: KENLSM. (In Russ.).

14. Lei Zu, Hui Xu, Bing Zhang, Debao Li, Huabi Wang, Bin Zi Filament-wound composite sleeves of permanent magnet motor rotors with ultra-high fiber tension, *Composite Structures*, Volume 204, 2018, pp. 525-535, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.119>.

15. Adams R. D., Cawley P. A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. *NDT International*. 1988;21(4):208–222. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(88\)90333-1](https://doi.org/10.1016/0308-9126(88)90333-1).

Вклад авторов:

М. В. Охотников. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса в области раз-

работки интегрированных стартер-генераторов для авиационных двигателей, оценка конструктивных подходов при разработке и изготовлении ротора, анализ нагрузки бандажа и магнитов ротора при работе, оценка возможности применения композитного бандажа, анализ возможных повреждений бандажа и постоянных магнитов, формулирование выводов по результатам расчётных и экспериментальных данных, подготовка текста статьи.

Ф. Р. Исмагилов. Проведение обзора подходов при разработке стартер-генератора для авиационного двигателя, разработка конструкции ротора интегрированного стартер-генератора с сегментированными постоянными магнитами и углеволоконным бандажом, выбор материалов (титан BT-22, магниты КС25ДЦ, углеволокно UMT530-12K-EP со связующим ХТ-187), анализ прочности элементов ротора, анализ результатов разгонных испытаний роторов с постоянными магнитами.

В. Е. Вавилов. Разработка методики и программы испытательных исследований прочности бандажа ротора, проектирование испытательного ротора и испытательной оснастки, организация и проведение разгонных испытаний ротора ступенчатым увеличением частоты вращения от 0 до 40 000 об/мин, анализ экспериментальных данных по нагрузке на бандаж, исследование возможных дефектов бандажа (расслоение, местный разрыв волокон), формулирование технологических причин возникновения дефектов для предотвращения их повторения.

Authors' contribution:

Mikhail V. Okhotnikov. Setting the aim and objectives, analysing the problem in the development of integrated starter-generators for aircraft engines, evaluating design approaches in the development and manufacture of the rotor, analysing the load on the rotor bandage and magnets during operation, assessing the possibility of using a composite bandage, evaluating possible damage to the bandage and permanent magnets, formulating conclusions based on the results of calculated and experimental data, preparing the text of the article.

Flyur R. Ismagilov. Conducting a review of approaches to developing a starter-generator for an aircraft engine, developing the design of a rotor for an integrated starter-generator with segmented permanent magnets and a carbon fiber bandage, selecting materials (VT-22 titanium, KS25DC magnets, UMT530-12K-EP carbon fiber with XT-187 binder), analysing the strength of rotor elements, evaluating the results of acceleration tests of rotors with permanent magnets.

Vyacheslav E. Vavilov. Development of a methodology and program for testing the strength of a rotor bandage, design of a test rotor and test equipment, organization and implementation of acceleration tests of the rotor by stepwise increasing the rotation speed from 0 to 40.000 rpm, analysing experimental data on the load on the bandage, evaluating possible defects of the bandage (delamination, local rupture of fibers), formulating technological causes of defects to prevent their recurrence.

Информация об авторах:

ОХОТНИКОВ Михаил Валерьевич, кандидат технических наук, директор Передовой инженерной школы «Моторы Будущего» Уфимского университета науки и технологий (УУНиТ), г. Уфа.

SPIN-код: 1559-1370

AuthorID (РИНЦ): 1006412

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4538-598X>

AuthorID (SCOPUS): 57201555771

ResearcherID: O-5118-2017

e-mail: oxothukob@mail.ru

ИСМАГИЛОВ Флюр Рашитович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Передовой инженерной школы «Моторы Будущего» УУНиТ, г. Уфа.

SPIN-код: 4349-7897

AuthorID (РИНЦ): 332890

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>

AuthorID (SCOPUS): 56462457100

e-mail: 1010ifr@mail.ru

ВАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич, доктор технических наук, заместитель директора ООО «ЭТК», г. Уфа.

SPIN-код: 4825-0915

AuthorID (РИНЦ): 694504

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>

AuthorID (SCOPUS): 55768854800

ResearcherID: N-9748-2017

e-mail: s2_88@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 09.12.2025; одобрена после рецензирования 27.02.2026; принята к публикации 11.06.2026.

Information about the authors:

OKHOTNIKOV Mikhail Valer'yevich, Candidate of Technical Sciences, Director of the "Motors of the Future" Advanced Engineering School, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 1559-1370

AuthorID (RSCI): 1006412

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4538-598X>

AuthorID (SCOPUS): 57201555771

ResearcherID: O-5118-2017

e-mail: oxothukob@mail.ru

ISMAGILOV Flyur Rashitovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Director of the "Motors of the Future" Advanced Engineering School, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 4349-7897

AuthorID (RSCI): 332890

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>

AuthorID (SCOPUS): 56462457100

e-mail: 1010ifr@mail.ru

VAVILOV Vyacheslav Evgen'yevich, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of ETK LLC, Ufa.

SPIN-code: 4825-0915

AuthorID (RSCI): 694504

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>

AuthorID (SCOPUS): 55768854800

ResearcherID: N-9748-2017

e-mail: s2_88@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 09.12.2025; approved after reviewing 27.02.2026; accepted for publication 11.06.2026.

УДК/UDC 624.131.439

DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-96-101>

EDN: JSXBKC

Научная статья/Original article

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УВЛАЖНЕНИЯ ГРУНТА В ПРОСТРАНСТВЕ

М. И. Гильдебрандт✉, Л. Б. Серкова

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

✉ migildebrandt@mail.ru

Актуальной задачей строительства оснований и фундаментов является совершенствование технологий подготовки используемых грунтов, которые должны соответствовать требованиям нормативной документации. Это позволит не только обеспечить эксплуатационную надежность грунтовых оснований, но и снизить материальные затраты на этапе подготовки.

Важным условием обеспечения надежности оснований является рациональное увлажнение на этапе подготовки. Проведение лабораторных исследований по изучению показателей увлажнения грунтовых оснований помогает совершенствовать технологии и добиваться наиболее высоких результатов.

Основная цель данной работы заключается в разработке конструкции устройства для контроля увлажнения грунта в пространстве с применением эмпирических методов исследования. Под термином «в пространстве» подразумевается возможность получения информации о влажности не только в одной точке, но и, потенциально, с определенной пространственной разрешающей способностью, что может быть полезно для анализа неоднородности увлажнения на определенной территории.

В работе представлены результаты разработки конструкции устройства для контроля увлажнения грунта в пространстве, которое позволит в ходе лабораторных исследований установить характер увлажнения каждого слоя песчаного грунта при заданном количестве воды. Полученные данные позволят разработать математическую модель послойного увлажнения грунта.

Ключевые слова: грунт, устройство, влажность, контроль увлажнения, основания, фундаменты

Для цитирования: Гильдебрандт М. И., Серкова Л. Б. Разработка конструкции устройства для контроля увлажнения грунта в пространстве. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 96–101. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-96-101>. EDN: JSXBKC.



© Гильдебрандт М. И., Серкова Л. Б., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF THE DEVICE FOR MONITORING SOIL MOISTURE IN SPACE

M. I. Gildebrandt✉, L. B. Serkova

Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

✉ migildebrandt@mail.ru

The urgent task in the construction of foundations and bases is to improve the technologies for preparing the soils, which should meet the requirements of regulatory documentation. It not only ensures the operational reliability of the soil bases, but also reduces the material costs at the preparation stage.

An important condition for ensuring the reliability of the bases is the rational moistening at the preparation stage. Conducting laboratory research to investigate the moisture indicators of the soil bases helps to improve the technologies and achieve the best results.

Therefore, the aim of the research is to develop the device design for monitoring soil moisture in space using empirical research methods. The term in space means the ability to obtain information about moisture not only at a single point, but potentially with a certain spatial resolution, which can be useful for analysing the heterogeneity of moisture distribution in a specific area.

The paper presents the results of developing the device design for monitoring soil moisture in space, which allows determining the moisture content of each layer of the sandy soil with a given amount of water by laboratory studies. The obtained data allows developing a mathematical model of layer-by-layer soil moisture.

Keywords: soil, device, humidity, moisture control, bases, foundations

For citation: Gildebrandt M. I., Serkova L. B. Development of the device for monitoring soil moisture in space. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):96–101. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-96-101>. EDN: JSXBKC. (In Russ.).



© Gildebrandt M. I., Serkova L. B., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Важным фактором, обеспечивающим бесперебойность работы системы транспорта и хранения углеводородов, является надежность строительства и эксплуатации резервуаров, в том числе и устройство их грунтовых оснований [1, 2]. Бесперебойность функционирования системы напрямую зависит от надежности ключевых элементов, и одним из таких, зачастую недооцененных, является устройство грунтовых оснований резервуаров. Именно на них ложится колоссальная нагрузка, и от их состояния зависит целостность и безопасность всей системы.

Резервуары для хранения углеводородов — это не просто емкости, а сложные инженерные сооружения, рассчитанные на хранение огромных объемов легко воспламеняющихся и взрывоопасных веществ. Любая, даже незначительная деформация или просадка основания может привести к катастрофическим последствиям: утечкам, пожарам, экологическим катастрофам и, как следствие, остановке поставок и колоссальным экономическим убыткам. Под основанием резервуара принято понимать массив грунта, который взаимодействует с резервуаром¹. В качестве оснований используется послойно уплотненный песчаный грунт, имеющий оптимальные значения влажности^{2,3} [3]. Важность увлажнения грунтовых оснований для различного типа сооружений отмечается многими авторами, в том числе зарубежными [4–9].

Процесс увлажнения — это не только изменение одного параметра. Он включает в себя множество

взаимосвязанных факторов, которые развиваются во времени и пространстве. Влажность грунта оказывает существенное влияние на его уплотнение. В течение всего срока эксплуатации грунтовые основания резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов подвергаются циклическим нагрузкам, возникающим при их заполнении и последующем опорожнении. Вследствие чего в основании резервуара имеют место деформации, величина которых в процессе эксплуатации не должна превышать расчётных значений⁴.

Для обеспечения контроля увлажнения грунта в лабораторных условиях⁵ известна установка, которая предназначена для определения фильтрационной способности грунта. Конструктивно установка представляет собой секцию трубы с отверстием, в которую помещается образец песчаного грунта. В этой секции имеется эластичная оболочка, которая не пропускает воду. В оболочке выполнено отверстие, совпадающее с отверстием в секции трубы. К данному отверстию подключен водосливной шланг, образующий герметичное соединение. В эластичную оболочку выше уровня водосливного шланга помещается дренирующий материал, поверх которого располагается нижний фильтр с нулевым сопротивлением. Далее на него помещается образец грунта, на который также располагают верхний фильтр с нулевым сопротивлением. Сверху находится шланг, подающий воду. Сток водоподающего шланга с эластичной оболочкой загерметизирован при помощи как минимум одной резиновой манжеты. В свою очередь шланг подключается к расши-

¹ ГОСТ 31385 — 2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Введ. 2017–03–01. Москва: Стандартинформ, 2016. 90 с.

² Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ 2023682416 Российская Федерация. Информационная модель грунта / Грузин А. В. № 2023681286; заявл. 17.10.2023; опублик. 25.10.2023. EDN: PZCYBC.

³ Патент 2707112 С1 Российская Федерация, МПК Е 02 D 1/02. Способ регулирования характеристик физических и механических свойств дисперсного несвязного грунта методом гранулометрического синтеза / Грузин А. В. № 2019107907; заявл. 20.03.2019; опублик. 22.11.2019. EDN: JEILKM.

⁴ Патент 2551088 С1 Российская Федерация, МПК Е 02 В 1/00, Е 02 D 1/00, G 01 N 1/00, Е 02 В 7/06. Способ оценки качества послойного уплотнения возведенных земляных насыпей автомобильных, железных дорог и плотин гидротехнических сооружений / Музафаров А. А. № 2013155650/13; заявл. 16.12.2013; опублик. 20.05.2015. EDN: ZLMWZQ.

⁵ Патент 93151 U1 Российская Федерация, МПК G 01 N 15/08. Установка для определения фильтрационной способности грунта / Пронозин Я. А., Уфуков П. П., Порошин О. С. № 2009110141/22; заявл. 20.03.2009; опублик. 20.04.2010. EDN: PNGDWL.

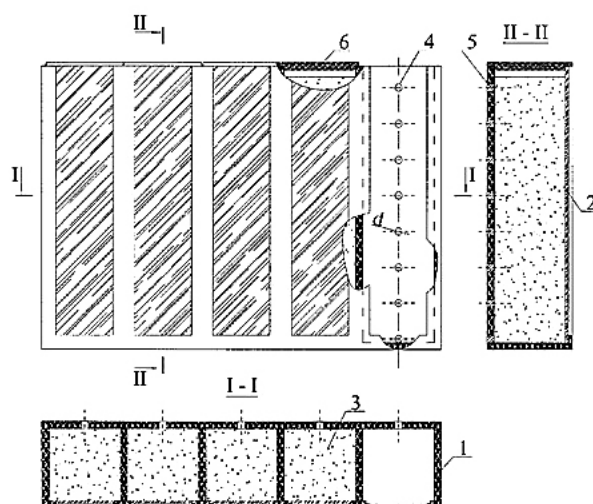


Рис. 1. Устройство для контроля увлажнения грунта:
1 — корпус прямоугольной формы; 2 — передняя стенка секций корпуса выполнена из прозрачного материала (поликарбонат или стекло); 3 — грунт; 4 — отверстия d; 5 — пробка; 6 — крышка

Fig. 1. Device for monitoring soil moisture:
1 — rectangular-shaped housing; 2 — front wall of housing sections made of transparent material (polycarbonate or glass); 3 — soil; 4 — d-holes; 5 — plug; 6 — cover

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

нительному баку. Водосливной шланг находится над сосудом, установленным на электронных весах. Для изменения напряженно-деформируемого состояния образца грунта установка имеет поршень и загружающий шток⁶. Однако данное устройство имеет низкую точность определяемых значений.

Также известно устройство для контроля увлажнения грунта⁷ (рис. 1).

Установка содержит n-секций с отверстиями, в которые засыпается грунт. Корпус устройства представляет собой параллелепипед, разделенный на отдельные секции, при этом передняя стенка выполнена из прозрачного материала, которая позволяет зрительно контролировать лабораторное исследование, а верхняя часть открывается для заправки и извлечения грунта, добавления воды. Необходимость крышки обосновывается отсутствием испарений во время проведения эксперимента. В противоположной стенке устройства для контроля увлажнения выполнены отверстия для извлечения проб грунта, которые при необходимости открываются и закрываются специальными пробками.

Извлеченные пробы исследуются в соответствии с ГОСТ 5180—2015⁸.

Полезная модель позволяет в лабораторных условиях обеспечить возможность контроля во времени и по глубине процесса увлажнения грунта в зависимости от его состава. Однако устройство позволяет контролировать процесс увлажнения только в одной точке в слое.

Известна и более совершенная конструкция описанного выше устройства⁹, отличающаяся тем, что в отверстия помещаются датчики контроля влажности грунта, что позволяет автоматизировать процесс. В конструкции предлагается извлечение грунта из нижней части устройства¹⁰. Основным недостатком рассмотренных конструкций является отсутствие возможности изучения распространения влажности грунта в пространстве. В связи с чем была предложена новая конструкция устройства для моделирования процесса увлажнения грунта¹¹.

Известна также полезная модель¹², включающая в себя цилиндрическую жесткую инфильтрационную колонку с одним датчиком измерения влажности, установленным у стенки (датчик 5, рис. 3 и 4 патента), предназначенную для испытания крупнозернистого грунта.

Недостатком рассмотренной полезной модели является цилиндрическая форма её жесткой инфильтрационной колонки (рис. 3 и 4 патента). Поскольку трудоёмкость изготовления цилиндрического корпуса из прозрачного материала, рассчитанного на перепад давлений в процессе эксплуатации, в лабораторных условиях выше, чем, например, у корпуса кубической формы. Для этой цели необходимо использовать трубы, изготовленные в заводских условиях. В свою очередь, использование труб заводского изготовления накладывает ограничения на доступный размерный ряд их диаметров и толщин.

Другим недостатком конструкции прибора является количество и место расположения датчика влажности. Наличие в приборе в исследуемом слое только одного датчика не позволяет учитывать стохастический характер состава грунта в поперечной плоскости и не позволяет корректно оценить величину влажности с помощью статистических методов. Расположение датчика у стенки прибора не исключает влияния на его показания так называемого краевого эффекта от материала самой стенки прибора, который (материал стенки) имеет отличные от грунта свойства смачиваемости.

Ещё одним недостатком конструкции прибора является возможность использования в нём только крупнозернистого грунта, что является следствием

⁶ Патент 239850 U1 Российская Федерация, МПК G 01 N 15/08. Устройство для контроля увлажнения грунта в пространстве / Грузин А. В., Гильдебрандт М. И., Серкова А. Б. № 2025116148; заявл. 11.06.2025; опубл. 17.12.2025. EDN: ZHSSFY.

⁷ Патент 147593 U1 Российская Федерация, МПК G 01 N 15/08. Устройство для контроля увлажнения грунта / Грузин А. В., Завьялов М. А., Антропова Л. Б., Коновалова А. Д. № 2014128104/28; заявл. 08.07.2014; опубл. 10.11.2014. EDN: MOQDCK.

⁸ ГОСТ 5180—2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Введ. 2016—04—01. Москва: Стандартинформ, 2016. 19 с.

⁹ Патент 178608 U1 Российская Федерация, МПК G 01 N 15/08, G 01 N 33/24, A 01 G 25/00. Устройство для контроля увлажнения грунта / Гильдебрандт М. И., Грузин А. В., Иванов Р. Н. № 2017127588; заявл. 01.08.2017; опубл. 11.04.2018. EDN: FFEDTH.

¹⁰ Патент 179559 U1 Российская Федерация, МПК G 01 N 15/08. Устройство для контроля увлажнения грунта / Гильдебрандт М. И., Грузин А. В., Иванов Р. Н. № 2018103982; заявл. 01.02.2018; опубл. 17.05.2018. EDN: KFSEYB.

¹¹ Патент 239850 U1 Российская Федерация, МПК G 01 N 15/08. Устройство для контроля увлажнения грунта в пространстве / Грузин А. В., Гильдебрандт М. И., Серкова А. Б. № 2025116148; заявл. 11.06.2025; опубл. 17.12.2025. EDN: ZHSSFY.

¹² Chen Zh., Wu J., In S., Wang H. Device for testing characteristic curves and permeability coefficients of unsaturated coarse-grained soils and water. CN patent 103308435 A; filed May 29th, 2013; published September 18th, 2013.

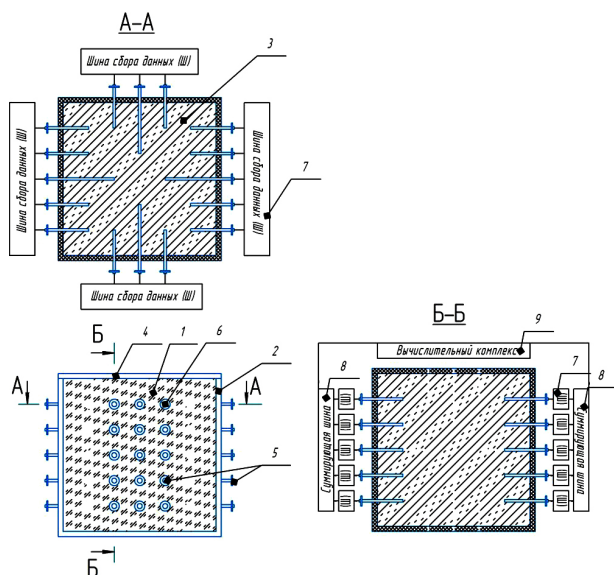


Рис. 2. Устройство для контроля увлажнения грунта в пространстве: 1 — ящик; 2 — корпус; 3 — образец грунта; 4 — крышка; 5 — датчики контроля влажности; 6 — отверстия; 7 — шина сбора данных; 8 — суммирующая шина; 9 — вычислительный комплекс
Fig. 2. Device for monitoring soil moisture in space: 1 — box; 2 — housing; 3 — soil sample; 4 — lid; 5 — moisture control sensors; 6 — holes; 7 — data collection bus; 8 — summation bus; 9 — computing complex
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

первого выше указанного недостатка (ограничения по диаметру и толщине стенки прибора).

Таким образом, целью работы является разработка конструкции для контроля увлажнения грунта в пространстве, предназначенного для исследования динамики пространственного характера увлажнения грунта в лабораторных условиях, что позволит провести ряд экспериментов, направленных на изучение свойств песчаного грунта, используемого при устройстве оснований зданий и сооружений нефтегазового комплекса, а также других отраслей строительства.

Основная часть

Устройство для контроля увлажнения грунта в пространстве предназначено для исследования динамики пространственного характера увлажнения грунта в лабораторных условиях, которое представляет собой кубический ящик. Корпус ящика выполнен из прозрачного материала (например, поликарбоната или стекла) для визуального контроля увлажнения грунта 3. На верхней части корпуса 2 ящика 1 расположена крышка 4, выполненная из того же материала, что и сам корпус 2, и предназначенная для предотвращения испарения воды. В ящике 1 на разных уровнях в разных точках осуществляется замер влажности с применением датчиков контроля влажности 5. В каждом уровне выполнены отверстия 6, в которые помещаются датчики контроля влажности (рис. 2). Оно представляет собой кубический ящик 1. Корпус 2 ящика выполнен из прозрачного материала (например, поликарбоната или стекла) для визуального контроля увлажнения грунта 3. На верхней части корпуса 2 ящика 1 расположена крышка 4, выполненная из того же материала, что и сам корпус 2, и предназначенная для предотвращения испарения воды. В ящике 1 на разных уровнях в разных точках осуществляется замер влажности с применением датчиков контроля влажности 5. В каждом уровне выполнены отверстия 6, в которые помещаются датчики контроля влажности 5, согласно рисунку. В каждом уровне

по каждой стороне куба датчики контроля влажности 5 подключены к шине сбора данных (Ш) 7, в свою очередь каждая из шин сбора данных (Ш) 7 подключается к суммирующим шинам 8, с которых общая информация передается на вычислительный комплекс 9. Он осуществляет обработку информации и составляет модель увлажнения грунта 3 по пространству.

Выбор типа грунта для основания играет не менее важную роль, чем его уплотнение. Согласно руководящим документам для сооружения основания резервуаров предпочтение отдается песчаному грунту средней крупности. Поэтому для проведения лабораторных исследований на стенде также используется грунт средней крупности [10–13].

Данный грунт обладает следующими характеристиками:

1. Хорошая дренирующая способность. Песчаные грунты хорошо пропускают воду, что предотвращает накопление влаги под резервуаром. Избыточная влага может привести к пучению грунта при замерзании или к снижению его несущей способности.

2. Высокая несущая способность. Песчаные грунты, особенно средней крупности, обладают хорошей способностью выдерживать нагрузки. При правильном уплотнении они формируют прочный и стабильный слой.

3. Устойчивость к деформациям. Песок средней крупности менее подвержен пластическим деформациям по сравнению с мелкозернистыми или глинистыми грунтами. Он лучше сохраняет свою форму под давлением резервуара.

4. Легкость уплотнения. Песчаные грунты средней крупности относительно легко поддаются уплотнению механическими способами, что позволяет достичь требуемой плотности и несущей способности.

Рассмотрим работу устройства. Образец грунта 3 заданной массы засыпают в ящик 1 корпуса 2 устройства для контроля увлажнения грунта 3 в пространстве (масса определяется в зависимости от объема ящика). Рассчитанное в зависимости от массы и исходной влажности образца грунта 3 количество воды заливают сверху в ящик и герметично закрывают его крышкой 4 для уменьшения потерь влаги через испарение во время проведения лабораторного исследования. Одновременно фиксируют время начала лабораторных исследований. В ящик 2 через отверстия 6 устанавливаются датчики контроля влажности 5 и подключаются к вычислительному комплексу 9. С течением времени датчики контроля влажности 5 фиксируют изменение влажности грунта 3.

С помощью вычислительного комплекса 9 можно построить объемную модель распределения влажности в любой момент времени. После проведения лабораторного испытания грунт 3 извлекается из ящика 1.

По переданным на вычислительную машину данным можно построить трехмерное графическое изображение, использующее все три оси координат для визуализации процесса увлажнения. Данное графическое изображение даёт возможность в полной мере передать всю глубину и динамику процесса увлажнения.

Проведение лабораторных исследований на устройстве для контроля увлажнения грунта в пространстве позволят изучить характер увлажнения, а также уточнить время, необходимое для

достижения слоем грунта оптимальной влажности. Значения оптимальной влажности были определены в ходе ранее выполненных исследований [14, 15].

Данное устройство имеет ряд значительных преимуществ:

1. Пространственное изучение оптимальной влажности. Вместо точечного и периодического контроля влажности грунта, который может не отражать реальную картину по всей площади основания, пространственное изучение предполагает комплексный анализ влажностного состояния материала в трех измерениях. Это позволяет выявить даже незначительные отклонения от оптимальных параметров, которые могут привести к неравномерной усадке, деформации или даже к разрушению основания в будущем.

2. Отсутствие специального оборудования. Нет необходимости в приобретении и обслуживании дорогостоящих приборов для каждого этапа контроля, а также в транспортировке и установке громоздкого оборудования. Отсутствие данных этапов значительно упрощает организацию работ.

3. Сокращение материальных затрат и временных рамок проведения строительных работ по устройству оснований резервуаров.

Заключение

В дальнейшем планируется патентование разработанного устройства, его сборка и проведение ряда экспериментов, направленных на изучение распределения влажности в пространстве. Этап патентования устройства позволит защитить интеллектуальную собственность и обеспечить возможность дальнейшего коммерческого использования, а также стимулировать дальнейшие исследования и разработки в этой области. Процесс сборки устройства предполагает переход от теоретической модели к реальному функционирующему прототипу, который будет готов к проведению испытаний.

Помимо научных исследований данная установка обладает значительным образовательным потенциалом. Она может стать незаменимым инструментом при проведении практических и лабораторных занятий по изучению свойств грунта. Использование такого устройства в образовательном процессе позволит перейти от абстрактных теоретических знаний к практическому опыту, делая обучение более увлекательным, наглядным и эффективным. Студенты смогут не только наблюдать за процессами, но и самостоятельно проводить эксперименты, анализировать полученные данные и делать выводы, что способствовало формированию глубокого понимания изучаемых явлений.

Понимание того, как влажность распределяется и изменяется, имеет огромное значение для множества областей, таких как строительство, сельское хозяйство и экология.

Разработанное устройство открывает новые горизонты как в области научных исследований, так и в сфере образования. Потенциал для изучения распределения влажности и свойств грунта огромен.

Список источников / References

1. Гайсин Э. Ш., Гайсин М. Ш. Современное состояние проблем обеспечения надежности резервуаров для нефти и нефтепродуктов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 2. С. 31–40. EDN: XAGIQL.

Gaysin E. Sh., Gaysin M. Sh. Current state of problems of oil tanks reliability. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2016;2:31–40. EDN: XAGIQL. (In Russ.).

2. Золенкова К. А. Анализ аварийности и причин аварий вертикальных стальных резервуаров // Научный Лидер. 2022. № 20 (65). С. 60–62. EDN: VTUVZZ.

Zolenkova K. A. Analiz avariynosti i prichin avariyn vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov. *Nauchnyy Lider*. 2022;20(65):60–62. EDN: VTUVZZ. (In Russ.).

3. Антропова Л. Б., Гильдебрандт М. И., Грузин А. В. Изменение характеристик деформируемости несвязных дисперсных грунтов оснований резервуаров для хранения нефти и продуктов её переработки // Россия молодая: передовые технологии — в промышленность. 2015. № 2. С. 94–98. EDN: VBERXN.

Antropova L. B., Gil'debrandt M. I., Gruzin A. V. Izmeneniye kharakteristik deformiruyemosti nesvyaznykh dispersnykh gruntov osnovaniy rezervuarov dlya khraneniya nefiti i produktov ee pererabotki. *Rossiya Molodaya: Peredovyye Tekhnologii v Promyshlennost'*. 2015;2:94–98. EDN: VBERXN. (In Russ.).

4. Lima C., Motta L. [et al.]. Mechanical Characterization of Fine-Grained Lateritic Soils for Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design. *Journal of Testing and Evaluation*. 2020;48(1):1–17. <https://doi.org/10.1520/JTE20180890>.

5. Bayomy F. M., Al-Sanad H. A. Deformation Characteristics of Subgrade Soils in Kuwait. *Transportation Research Record*. 1993;1406:77–87.

6. Агаханов Э. К., Агаханов С. А., Агаханов Г. Э. Моделирование влажностных напряжений в грунтовом полупространстве // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т. 50, № 2. С. 160–168. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2023-50-2-160-168>. EDN: SYTPMG.

Agakhanov E. K., Agakhanov S. A., Agakhanov G. E. Modeling of humidity stresses in a soil half-space. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2023;50(2):160–168. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2023-50-2-160-168>. EDN: SYTPMG. (In Russ.).

7. Саламова К. Д., Руми Д. Ф. Трансформация напряженно-деформированного состояния основания сооружения при неравномерном увлажнении грунта // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2016. № 5. С. 94–99. EDN: VTKBJT.

Salyamova K. D., Rumi D. F. Transformation of stress-strain state of structure foundation under non-uniform moistening of soil. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after. V. G. Shukhov*. 2016;5:94–99. EDN: VTKBJT. (In Russ.).

8. Агаханов Г. Э. Математическое моделирование влажностных напряжений в грунтовом полупространстве // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7, № 3 (28). С. 86. <https://doi.org/10.15862/12TVN315>. EDN: SLACTF.

Agakhanov G. E. Mathematical modeling of humidity stresses in a soil half-space. *Internet-Zhurnal Naukovedeniye*. 2015;7(3):86. <https://doi.org/10.15862/12TVN315>. EDN: SLACTF. (In Russ.).

9. Мещерякова А. М., Ловцов А. Д. Влияние пониженных характеристик грунта на напряженно-деформированное состояние здания // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2013. № 1. С. 201–205. EDN: RHJAXD.

Mesheryakova A., Lovtsov A. Effect of reduced soil conditions on the building stress-strain state. *Dal'niy Vostok: Problemy Razvitiya Arkhitekturno-Stroitel'nogo Kompleksa*. 2013;1:201–205. EDN: RHJAXD. (In Russ.).

10. Грузин А. В., Антропова Л. Б. Особенности подготовки песчаного основания резервуара РВС-50000 // Управление инновациями: теория, методология, практика. 2014. № 11. С. 96–99. EDN: SZTQBZ.

Gruzin A. V., Antropova L. B. Osobennosti podgotovki peschanogo osnovaniya rezervuara RVS-50000. *Upravleniye*

Innovatsiyami: Teoriya, Metodologiya, Praktika. 2014;11:96–99. EDN: SZTQIBZ. (In Russ.).

11. Горелов А. С. Неоднородные грунтовые основания и их влияние на работу вертикальных стальных резервуаров: монография. Санкт-Петербург: Недра, 2009. 220 с. ISBN 9785940891308.

Gorelov A. S. Neodnorodnyye gruntovyye osnovaniya i ikh vliyaniye na rabotu vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov. Saint Petersburg, 2009. 220 p. ISBN 9785940891308. (In Russ.).

12. Awwad T., Gruzin A., Gruzin V. Upgrading of the Technologies of Soil Preparation and Construction of Foundations for Structures of Oil and Gas Industry. *Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures*. Egypt, 2019. P. 64–72. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01923-5_6.

13. Ухов С. Б., Семенов В. В., Знаменский В. В. [и др.]. Механика грунтов, основания и фундаменты. Москва: Высшая школа, 2007. 566 с. ISBN 978-5-06-003868-2. EDN: QNMXTG.

Ukhov S. B., Semenov V. V., Znamenskiy V. V. [et al.]. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenti*. Moscow, 2007. 566 p. ISBN 978-5-06-003868-2. EDN: QNMXTG. (In Russ.).

14. Гильдебрандт М. И., Антропова Л. Б., Щипкова Ю. В. [и др.]. Обработка результатов лабораторных исследований увлажнения грунтов оснований резервуаров // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2018. № 5(131). С. 121–125. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-5-121-125>. EDN: VLSMXA.

Gildebrandt M. I., Antropova L. B., Shchipkova Yu. V. [et al.]. Processing the results of laboratory studies of moisture ground mounting of tank bases. *Oil and Gas Studies*. 2018;5(131):121–125. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-5-121-125>. EDN: VLSMXA. (In Russ.).

15. Кононова М. И., Серкова Л. Б., Медкова Э. Ю. [и др.]. Изменение деформационных характеристик оснований резервуарного парка в составе транспортной системы // Транспортное дело России. 2019. № 4. С. 145–148. EDN: KBHYUP.

Kononova M. I., Serkova L. B., Medkova E. Yu. [et al.]. Change of deformation characteristics of the foundations of the reservoir park in the transport system. *Transport Business in Russia*. 2019;4:145–148. EDN: KBHYUP. (In Russ.).

Вклад авторов:

М. И. Гильдебрандт. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, оценка результатов разработанной конструкции, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

Л. Б. Серкова. Проведение обзора, проведение лабораторных исследований на устройстве для контроля увлажнения грунта в пространстве и анализ результатов.

Authors' contribution:

Margarita I. Gildebrandt. Setting research aim and objectives, analysing the problem, evaluating the results of the developed design, formulating conclusions and preparing the text of the article.

Lyubov B. Serkova. Conducting a review and laboratory tests on a device for monitoring soil moisture in space, analysing the results.

Информация об авторах:

ГИЛЬДЕБРАНДТ Маргарита Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 8369-6750

AuthorID (РИНЦ): 829999

AuthorID (SCOPUS): 57201776013

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3334-9888>

e-mail: migildebrandt@mail.ru

СЕРКОВА Любовь Борисовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1236-8615

AuthorID (РИНЦ): 829575

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5918-2476>

e-mail: lbserkova@omgtu.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025; одобрена после рецензирования 05.03.2026; принята к публикации 10.06.2026.

Information about the authors:

GILDEBRANDT Margarita Ivanovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Oil and Gas Storage, Standardization and Certification Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 8369-6750

AuthorID (RSCI): 829999

AuthorID (SCOPUS): 57201776013

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3334-9888>

e-mail: migildebrandt@mail.ru

SERKOVA Lyubov Borisovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Oil and Gas Storage, Standardization and Certification Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 1236-8615

AuthorID (RSCI): 829575

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5918-2476>

e-mail: lbserkova@omgtu.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 22.10.2025; approved after reviewing 05.03.2026; accepted for publication 10.06.2026.

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СТУПЕНЧАТОГО ГАЗОВОГО СЛОЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ОПОРАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО И ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. С. Курзаков 

Сибирский федеральный университет,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

 kurzakov@list.ru

В статье представлены результаты разработки и исследования подхода, позволяющего построить расчётную сетку тонкого ступенчатого газового слоя, обеспечивающего несущую способность в опорах измерительного и диагностического оборудования высокой точности. Отмечается, что традиционные методы для автоматической генерации расчётной сетки обычно приводят к искажению исходной геометрии и, как следствие, к невозможности корректного моделирования течения газа.

Автором предложена методика, основанная на разложении модели на простые тела, которая позволяет формировать расчётную сетку правильной структуры с требуемой формой и ориентацией элементов. Важным компонентом предложенной методики является комплекс настроек, применяемых к модели с целью обеспечения межзонных интерфейсов, настройки граничных условий, а также для последующей инициализации решения и обеспечения сходимости при расчётах в системе ANSYS Fluent.

В исследовании также приведены результаты, иллюстрирующие ход тестовых расчётов и подтверждающие эффективность разработанного подхода при моделировании состояния смазочного газового слоя.

Ключевые слова: газостатический подшипник, тонкий смазочный слой, структурированная сетка, ANSYS Fluent, межзонные интерфейсы, распределение давления, моделирование течения

Для цитирования: Курзаков А. С. Формирование и исследование модели ступенчатого газового слоя для применения в опорах измерительного и диагностического оборудования. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 102–111. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-102-111>. EDN: NWVIQC.



© Курзаков А. С., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

FORMATION AND INVESTIGATION OF A STEPPED GAS-LAYER MODEL IN MEASURING AND DIAGNOSTIC EQUIPMENT SUPPORTS

A. S. Kurzakov 

Siberian Federal University,
Svobodnyy Ave., 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia

 kurzakov@list.ru

The article demonstrates the results of the development and research of an approach that allows constructing a computational grid of a thin stepped gas layer that provides load-bearing capacity in the supports of high-precision measuring and diagnostic equipment. Moreover, it is noted that traditional methods for automatic generation of the computational grid usually lead to distortion of the initial geometry and, as a result, to the impossibility of correct modeling of the gas flow.

The author suggests a method based on decomposing the model into simple bodies, which allows forming a computational grid of the correct structure with the required shape and orientation of the elements.

An important component of the proposed methodology is a set of settings applied to the model in order to provide interband interfaces, adjust boundary conditions, as well as for subsequent initialization of the solution and ensure convergence in calculations in the ANSYS Fluent system.

In addition, the author presents the results that demonstrate the course of test calculations and validate the effectiveness of the proposed approach during the simulation of the lubricating gas layer.

Keywords: gasostatic bearing, thin lubricating layer, structured mesh, ANSYS Fluent, zone interfaces, pressure distribution, flow modeling

For citation: Kurzakov A. S. Formation and investigation of a stepped gas-layer model in measuring and diagnostic equipment supports. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):102–111. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-102-111>. EDN: NWVIQC. (In Russ.).



© Kurzakov A. S., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Газостатические опоры известны с конца XIX в., когда были получены результаты первых исследований в данной области. Известные работы, отражающие исследования газовых подшипников узлов вращения, а также уплотнений для направляющих различной конфигурации, послужили основой при дальнейшей разработке газостатических и газодинамических опор различных разновидностей [1, 2]. Теория расчёта газовых опор получила значительное развитие во второй половине XX в., когда методы расчёта и анализа газовых опор были обобщены, а также были усовершенствованы подходы к решению нелинейных уравнений, описывающих течение газа в несущем слое [3]. В дальнейшем были разработаны численные схемы блочного типа, а также различные методы линеаризации, позволившие получать численные решения уравнения Рейнольдса [4, 5]. Кроме этого, были предложены методы орбит и скачков нагрузки, призванные обеспечить возможность моделирования динамического состояния ротора на газовом подвесе [6, 7].

Совершенствование методик расчёта, а также развитие доступной вычислительной техники привело к усложнению используемых моделей, в которые был введён учёт геометрических отклонений, значительных нелинейностей и эффектов неустойчивости различного типа. Проведённые исследования позволили заключить, что даже незначительные изменения геометрии поверхностей, формирующих газовый слой, могут приводить к принципиальным изменениям в основных характеристиках опор (прежде всего, несущей способности и податливости) [8, 9]. В то же время развитие теории газовой смазки продолжало основываться на подходах, заложенных Рейнольдсом.

С развитием промышленности ужесточались требования к точности, достоверности и надёжности измерительного и диагностического оборудования. Данным тенденциям применение газостатических опор полностью соответствовало, поэтому такие опоры нашли применение в качестве опор высокоточных шпинделей приборов, в координатно-измерительных машинах, в установках для изготовления микросхем с использованием литографии и во многих подобных системах, где критически важным оказывается возможность реализации по-

зиционирования с точностью до долей микрометра и даже до нанометров^{1,2} [10, 11].

В оптическом приборостроении, а также при реализации технологических процессов микрообработки ключевую роль играет подавление возможных вибраций, при этом газостатические опоры проявляют свои преимущества в полной мере. Кроме того, в подобных применениях они обеспечивают очень высокую повторяемость позиционирования и стабильность перемещений, что обусловлено полным отсутствием трения покоя и чрезвычайно малым трением скольжения [12]. Газостатические опоры успешно применяются в контактных измерительных устройствах (профилометры, стилусные датчики). В данных приборах востребованы стабильность характеристик и отсутствие трения, а также возможность обеспечить практически постоянную величину нагрузки на чувствительный элемент [13–15].

В современных приборах высокой точности, требующих обеспечения прецизионных перемещений, находят применение газостатические направляющие с дросселями типа «простая диафрагма», характеризующиеся наличием карманов малого объёма. При корректном выборе параметров таких опор возможно значительное улучшение динамических характеристик, а также подавление микровибраций, обусловленных флуктуациями газового потока [16–18]. Наличие работ, направленных на анализ и исследование особенностей возникающих турбулентных режимов и вихревых потоков вблизи питающих отверстий, в частности при наличии микроканалов, говорит об актуальности исследований, направленных на моделирование особенностей потока в масштабах долей микрометра [19–23].

Применение газостатических опор в обрабатывающем оборудовании, используемом в машиностроении, носит ограниченный характер. Это объясняется тем, что в силу отсутствия жидкой либо пластичной смазки значительно возрастает риск повреждения поверхностей опоры при непреднамеренном контакте движущихся узлов, поскольку традиционная механическая обработка зачастую характеризуется достаточно жёсткими режимами эксплуатации. Напротив, измерительное либо диагностическое оборудование используется преиму-

¹ Пинегин С. В. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой. Москва: Машиностроение, 1984. 215 с.

² Пешти Ю. В. Газовая смазка. Москва: Изд-во МГТУ, 1993. 381 с. ISBN 5-7038-0942-8.

щественно в условиях измерительных лабораторий, а эксплуатация данного оборудования осуществляется исключительно подготовленным персоналом. Соответственно, условия работы газовых опор, потенциально применяемых в оборудовании данных лабораторий, оказываются гораздо более безопасными с точки зрения сохранности рабочих поверхностей. Другим немаловажным фактором является качество подготовки воздуха, требуемого для работы газостатических опор, который может осушаться и очищаться специальным оборудованием лаборатории в противовес техническому сжатому воздуху, используемому в основных пневматических сетях машиностроительного предприятия.

Если вернуться в рамках данного краткого обзора к развитию вычислительной техники и сопутствующих технологий, можно отметить, что в 1960–1970-х гг. наблюдался активный рост числа исследований, связанных с использованием численного моделирования. Внимание исследователей в области газовой смазки было направлено на численное решение уравнений течения смазочной среды и соответствующее определение величин, характеризующих поток, а также на исследование устойчивости [24–26]. Однако нельзя не отметить, что требуемые затраты вычислительных ресурсов остаются весьма существенными несмотря на прогресс ЭВМ. Методы, основанные на вычислительной гидро- и газодинамике (Computational Fluid Dynamics, CFD), позволяют достичь высокой точности при осуществлении численного моделирования, а также использовать удобные для исследователей средства анализа и визуализации потоков, однако их использование сопряжено со сложностями настройки моделей и с необходимостью обеспечить значительные вычислительные мощности [27]. Данные обстоятельства ограничивают применение методов CFD в случае необходимости выполнения массовых расчётов, например, при решении задач оптимизации. В известной степени альтернативой являются конечно-элементные методы (Finite Element Method, FEM), которые позволяют разрабатывать и исследовать модели газовых опор, хорошо согласующиеся с моделями механики деформируемого тела, а также с мультифизическими моделями, учитывающими тепловые, электрические и другие процессы [28, 29].

Одним из перспективных направлений развития конечно-элементного моделирования является использование р-FEM формулировок, подразумевающих повышение порядка полиномов, аппроксимирующих функции распределения параметров потока между ячейками. Этим обеспечивается быстрое достижение непрерывности давлений на границах ячеек, а также получение высокой точности при моделировании потоков, характеризующихся значительными градиентами. Также известны работы, в которых подход на основе FEM используется комплексно — не только для моделирования газовых потоков, но и для моделирования взаимодействующих с ними твердотельных структур. В результате упрощается и повышается точность анализа обратного влияния деформации этих структур на характеристики рабочего состояния газовых опор [30–32]. Соответственно, такое объединение в общей вычислительной среде программных модулей, реализующих решение уравнений газового потока, с модулями расчёта состояния деформированного твёрдого тела позволяет исследовать весь комплекс значимых параметров приборов и определять ре-

комендуемые либо оптимальные значения данных параметров в условиях, во-первых, сложной геометрии, с учётом реальных погрешностей изготовления узлов, и, во-вторых, ограниченных временных и вычислительных ресурсов [33–35].

Определение цели и задач

Газостатические опоры широко применяются в измерительном и диагностическом оборудовании, что объясняется их существенными преимуществами перед традиционными контактными опорами и значительным объёмом проведённых в прежние годы исследований и накопленных знаний, в том числе в области вычислительного моделирования, базирующегося на основе построения расчётных сеток для несущих газовых слоёв с характерной геометрией. В то же время, известные публикации направлены, прежде всего, на развитие и совершенствование различных математических моделей.

Распространённые системы конечноэлементного моделирования предлагают инструменты, обеспечивающие возможность выполнения автоматической генерации сетки, однако их использование приводит к неприемлемому искажению геометрии получаемого слоя и, как следствие, к ошибкам либо невозможности дальнейшего моделирования. Соответственно, возникает необходимость в разработке специализированной методики дискретизации расчётного домена, обеспечивающей требуемую форму и ориентацию элементов домена.

Следовательно, целью данного исследования является разработка воспроизводимого метода построения расчётной сетки, пригодной для эффективного моделирования газостатических опор при обеспечении сходимости и устойчивости расчёта.

Основная часть

Подача смазки (жидкости либо газа) в бесконтактные опоры выполняется через совокупность каналов, карманов, дросселей и других элементов, имеющих разнообразную форму, а также масштаб. Суммарный объём упомянутых элементов для газостатических опор имеет принципиальное значение, поскольку наличие значительных объёмов приводит к неустойчивости по причине сжимаемости газа (очевидно, для гидростатических опор данное обстоятельство имеет гораздо меньшее значение). Соответственно, в случае гидростатических опор создание сеток для многих элементов тракта подачи смазочной среды обычно не вызывает затруднений. В то же время для газостатических опор, содержащих в конструкции щелевые дроссели, практически весь тракт нагнетания представляет собой тонкие газовые слои толщиной 20 мкм и менее. В данной ситуации использование автоматических средств генерации сетки оказывается невозможным в силу ряда обстоятельств.

Если для описанных задач используется комплекс ANSYS, в нём применяется специальная функция, обеспечивающая расширенное управление размерами ячеек (Advanced Size Function), которая позволяет упростить получение приемлемой для расчётов сетки. Совокупность параметров данной функции настраивается автоматически в модуле Meshing на основе того, какая физическая модель (твердотельная либо жидкостная) была задана. В случае задачи газовой смазки была выбрана модель CFD. Модуль Meshing, будучи использованным в качестве компонента системы Fluid Flow, представленного в проекте среды ANSYS Workbench, получа-

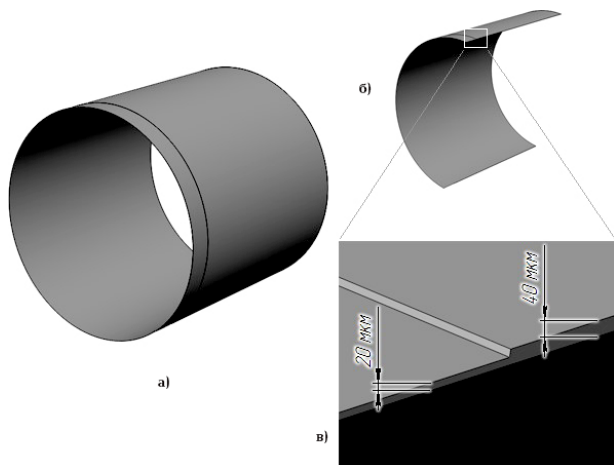


Рис. 1. Моделируемый ступенчатый слой:
а) общий вид; б) разрез вдоль оси вращения;
в) увеличенное изображение ступени
Fig. 1. Modeled stepped layer:
a) general view; б) cross-sectional view along
the axis of rotation;
в) enlarged view of the step
Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

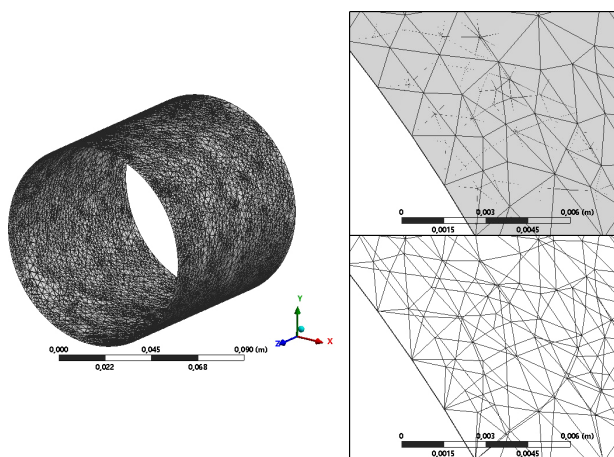


Рис. 2. Сетка из тетраэдрических элементов
Fig. 2. Tetrahedral mesh
Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

ет соответствующие настройки автоматически. В то же время, если модуль Meshing представлен в виде самостоятельного компонента среды Workbench, режимом создания сетки является значение по умолчанию (Mechanical), и в этом случае расширенное управление размерами ячеек оказывается отключённым. Данное обстоятельство принципиально важно при создании сетки для модели газового потока, поскольку получаемая при этом сетка оказывается практически непригодной для моделирования.

При выполнении данного исследования производилось построение конечно-элементной сетки для фрагмента несущего слоя в виде части цилиндрического подшипника Адамса, имеющего ступенчатую конфигурацию (рис. 1). Кольцевая область имела длину в осевом направлении 100 мм при таком же диаметре.

Запуск генерации расчётной сетки в модуле ANSYS Meshing при включённом режиме CFD приводит к тому, что создаётся сравнительно про-

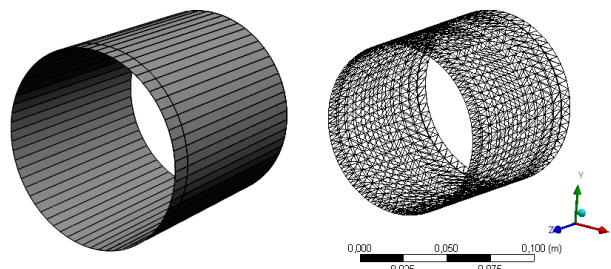


Рис. 3. Многогранный слой
Fig. 3. Multisurface layer
Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

стая сеточная структура, содержащая 11082 узла и 32442 элемента. Однако, как показывает анализ, качество сгенерированной сетки является неприемлемым (рис. 2). Можно отметить, что полученная сетка в основном образована тетраэдрами. Их размещение в пределах исходной геометрии возможно только при наклонном положении рёбер и граней. В то же время ожидаемое направление течения газового потока, очевидно, должно располагаться вдоль оси вращения модели. В результате наклонные рёбра и грани пересекают поток под острым углом. По этой причине расход смазочной среды между ячейками учитывается некорректно. Ещё более существенным фактором является то, что происходит автоматическое упрощение исходных геометрических форм: ступень, присутствующая в исходной геометрии (рис. 1в), исчезает. В результате возникает новая конфигурация наружной поверхности, и общая форма несущего слоя подшипника нарушается.

Поскольку автоматическое упрощение сетки (defeaturing) является отключаемой опцией, можно отказаться от его использования. Такой вариант позволяет избежать уничтожения ступени, однако в этом случае при генерации сетки имеет место попытка создания чрезмерно большого количества элементов. Соответственно, в то время как для многих задач анализа течения газа автоматическая генерация является вполне приемлемым вариантом, для задач газовой смазки при характерной толщине газовых тел 20 мкм и менее получаемые сетки делают расчёт в ANSYS Fluent невозможным по причине исчезновения важных компонентов геометрии.

С целью решения обозначенной проблемы был разработан подход, предусматривающий использование многогранного тела вместо гладкого цилиндра (рис. 3). В результате все рёбра гладкой геометрии приобретают исключительно прямолинейную форму. В рассматриваемом здесь примере было принято разбиение внутренней поверхности, образующей несущий слой, на 64 грани. Аналогичным образом было выполнено разбиение совокупности внешних граней. Все торцевые поверхности были представлены тремя объединёнными гранями, что составило 195 исключительно плоских граней. Для такой модели возможна генерация сетки в модуле Meshing с использованием всех параметров, задаваемых по умолчанию, однако анализ показывает, что сглаживание ступени также имеет место. Если же отключить режим автоматического упрощения, автоматическая генерация сетки происходит успешно и с сохранением ступени.

Однако данная сетка вновь строится на основе тетраэдров, пересекающих слой под острым углом,

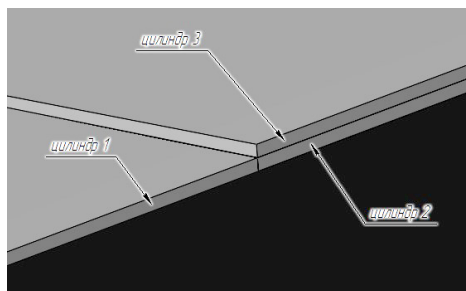


Рис. 4. Стык простых цилиндрических тел (разрез)

Fig. 4. Junction of simple cylindrical bodies (cross-section)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

что приводит к невозможности корректного расчёта параметров потока в модуле Fluent. На основе проведённых исследований был сделан вывод о том, что доступные способы автоматического создания расчётной сетки не могут обеспечить её приемлемое качество.

Помимо рассмотренных инструментов были исследованы и другие подходы к созданию требуемой структуры сетки. Одним из таких подходов является использование виртуальной топологии. Он состоит в добавлении дополнительных точек и рёбер на исходной модели, однако подобные действия для моделей, используемых в газовой смазке, оказываются чрезвычайно трудоёмкими. Кроме того, виртуальная топология размещается на внешних поверхностях и слабо влияет на внутреннюю структуру сетки. В качестве ещё одной альтернативы был рассмотрен метод переноса геометрии. Его суть состоит в реализации возможности копирования контуров рёбер с одних поверхностей на другие. Однако для тонких слоёв такой перенос происходит некорректно. Следовательно, применение подхода, называемого многозонным, также оказывается недоступным.

Получение расчётной сетки, отвечающей требованиям моделирования газовых потоков в тонком слое, в автоматическом режиме оказывается возможным лишь в том случае, когда исходная геометрия газовых слоёв представлена в виде совокупности максимально упрощённых тел. Для такой геометрии модуль Meshing может качественно сформировать требуемые элементы даже при малой толщине слоя. Наиболее простым элементом в данном контексте можно было бы считать гексаэдр, однако для их получения потребовалось бы разделить многогранное тело на весьма большое количество частей (в упоминавшемся примере возникло бы 192 гексаэдра). Если же представить рассматриваемую модель в виде совокупности цилиндров, то в нашем случае таковых окажется только три.

Соответственно, рассматриваемая модель была разбита на три цилиндрических тела, каждое из которых имело толщину 20 мкм (рис. 1). При общей длине моделируемого слоя 100 мм два больших цилиндра, вложенных один в другой, имеют длину 90 мм в осевом направлении, а малый цилиндр (по конфигурации он представляет собой кольцо, но здесь будем использовать общий термин) пристыкован к большому внутреннему цилиндру с меньшим диаметром (рис. 4). В результате для указанных простых тел становится возможной автоматическая генерация расчётной сетки, не препятству-

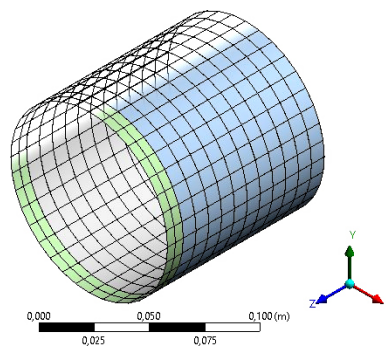


Рис. 5. Сетка, сгенерированная на основе простых цилиндрических тел

Fig. 5. Mesh generated from simple cylindrical bodies

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

ющей корректному выполнению моделирования. При этом формируются элементы гексаэдрической формы, грани которых оказываются практически перпендикулярны направлению потока. Здесь следует отметить, что направлением ещё большего упрощения геометрии является использование объединённого цилиндра длиной 90 мм с толщиной слоя, равной 40 мкм. Однако в таком случае топология с малого цилиндрического слоя переносится на торец большого объединённого цилиндра и имеет место (неуспешная) попытка развить эту топологию в большом цилиндре, а генерация сетки в автоматическом режиме оказывается невозможной.

Полученная описанным способом сетка содержит в совокупности 1944 узла и 864 элемента (рис. 5). В зоне больших цилиндров присутствует два элемента по толщине, а в зоне малого слоя — один элемент по толщине слоя. Данная сетка характеризуется высоким ортогональным качеством и может быть успешно использована для моделирования течения газа в модуле Fluent.

Модуль Fluent при выполнении данного исследования являлся частью проекта, сформированного в среде ANSYS Workbench. Загрузка сгенерированной сетки в этот модуль выполнялась из предшествующих модулей проекта, представленных ячейками «Geometry» и «Mesh». Кроме того, связь между модулями проекта обеспечивала передачу любой другой вспомогательной информации. В данной работе активно использовались именованные выборы, позволяющие на этапе разработки геометрической модели газового тела заранее подготовить процесс автоматического присвоения корректных типов зонам модели.

Движение смазки в газовом слое обеспечивается заданием корректных граничных условий. Для рассматриваемой здесь модели вход газа осуществляется со стороны свободного торца больших цилиндров (рис. 5). Указанные торцы были включены в соответствующий именованный выбор. С целью автоматизации определения модулем Fluent типа границ в названиях именованных выборов были использованы особые префиксы. В целом возможно задание данным способом различных типов границ, например, скорости, массового расхода, давления. В рассматриваемом случае известной величиной является давление, поэтому использовались соответствующие префиксы pressure_inlet (входное давление) и pressure_outlet (давление на выходе).

Поскольку в модели присутствует два больших цилиндра, были использованы имена NS_Pressure_Inlet1 и NS_Pressure_Inlet2. На выходном торце, расположенном на малом цилиндре, использовалось имя NS_Pressure_Outlet. Здесь содержится дополнительный префикс «NS» (Named Selection, именованный выбор), который для распознавания модулем генерации сетки (Meshing) не является обязательным. Однако данный префикс применяется специальными модулями ANSYS, встраиваемыми в сторонние системы трёхмерного моделирования. В рамках данного исследования был использован пакет SolidWorks, а на этапе построения модели в данном пакете были заданы упомянутые имена, которые в дальнейшем автоматически распознаются (при задании соответствующей настройки) в компонентах рабочего проекта среды Workbench.

Наличие именованных выборов в конечном итоге приводит к тому, что модуль Fluent назначает корректные типы граничных условий соответствующим поверхностям модели. В ходе данного исследования на входных зонах было задано давление (Gauge Total Pressure), равное 0,2 МПа. Также задавалось значение исходного давления, используемое в процессе стандартной инициализации решения. Как показали исследования, если оставить данное давление нулевым (значение по умолчанию), получаемое при инициализации поле давлений существенно искажается, что резко увеличивает продолжительность вычислений.

Поскольку расчётная сетка построена на основе самостоятельных цилиндрических тел (рис. 1), геометрически соприкасающиеся зоны модели не трактуются в модуле Fluent в качестве взаимно проникаемых. В результате возникает необходимость ручного задания интерфейсов, которые организуют взаимосвязь зон для обеспечения беспрепятственного протекания газового потока.

Следует отметить, что формирование проникаемых границ между зонами в модуле Fluent также доступно, для чего требуется выполнение нескольких условий. Прежде всего было выполнено объединение трёх тел модели в единую деталь. Для этого была использована соответствующая команда собственного редактора комплекса ANSYS DesignModeler. Кроме того, была осуществлена специальная настройка в модуле Meshing, предотвращающая создание соединений (Connections) на этапе импорта геометрии. Таким образом, в модуль Fluent не передаются какие-либо предварительно созданные контактные области. В дополнение к упомянутым действиям выполнялась проверка модели на отсутствие интерфейсных зон (тип «interface»), которые могут привести к невозможности автоматического создания стыков в модели.

При соблюдении упомянутых условий модуль Fluent может автоматически распознать все пространственные зоны как компоненты одной общей детали. На стыках исходных тел формируются зоны внутреннего типа «interior», не препятствующие протеканию газового потока и обеспечивающие возможность выполнения моделирования течения.

В качестве альтернативы редактора параметрического моделирования ANSYS DesignModeler был рассмотрен редактор ANSYS SpaceClaim, основанный на принципах прямого моделирования. Анализ показал, что данный редактор не обладает функционалом формирования общей детали из нескольких тел. Использование соответствующей команды формирования компонента (Move To New

Component) данного редактора выполняет группировку, но получаемая группа не трактуется модулем Meshing в качестве одной детали. Соответственно, геометрия газового тела не передаётся далее в модуль Fluent в качестве единого тела с зонами. Помимо указанного обстоятельства, редактор SpaceClaim не обладает функционалом изменения типа объекта с твердотельного на жидкостный. Следовательно, соответствующие настройки модели на последующих этапах требуется выполнять вручную, иначе корректное построение сетки предложенными методами окажется недостижимым.

Полученная описанным способом сетка газового слоя, позволяющая реализовать движение газа между зонами расчётного домена, была использована для расчёта в стационарном (steady) режиме, который задавали в разделе General → Solver → Time. Материалом рабочей среды являлся воздух. Важное значение может иметь формулировка плотности материала, и в рамках данной работы были исследованы характеристики вычислительного процесса в случае использования постоянной плотности, закона идеального газа либо сжимаемой жидкости. Однако исследования позволили сделать вывод, что в случае стационарного режима расчёта получаемое распределение давления в газовом слое практически не зависит от этого обстоятельства.

Известно, что количество выполняемых итераций (всего при стационарном расчёте либо на каждый временной шаг при нестационарном) требуется задать вручную. В случае достижения сходимости (отслеживаемой по величине конечных разностей) решения выполняются не все итерации, а происходит завершение вычислений (либо переход к следующему шагу).

Однако при решении нестационарных задач, если сходимость не достигается на данном временном шаге, весьма вероятным оказывается расхождение расчёта на последующих шагах. Во избежание этого приходится задавать увеличенное количество итераций (в нашем случае — 100 и более). Проблемой является то, что в силу специфики моделирования газостатических опор, решения, получаемые на последовательных временных шагах, мало отличаются. По этой причине возникает значительное масштабирование конечных разностей, в результате чего задаваемый по умолчанию порог сходимости (имеет значение 0,001) оказывается недостижимым. Таким образом, на каждом шаге (при нестационарном расчёте) происходит выполнение всех запланированных итераций. Имеющиеся средства автоматического отслеживания выполняют проверку конечных разностей, но их значения искажаются масштабированием.

Как показывают исследования, масштабированные конечные разности по компонентам скорости x и y , а также по непрерывности потока заметно снижаются в течение первых 10–15 итераций (рис. 6). Конечные разности по компоненте скорости z продолжают снижаться в течение примерно 40 итераций. Соответственно, значимая часть вычислений практически выполняется в течение 15–40 итераций, и дальнейшие расчёты являются излишними, значительно увеличивая затраты времени.

С целью решения обозначенной проблемы потребовалось отключить масштабирование конечных разностей (опция Solution → Monitors → Residual → Residual Values → Scale). При такой настройке модуля Fluent происходит мониторинг абсолютных,

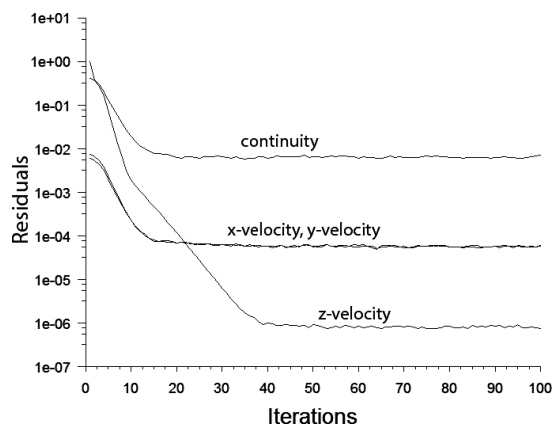


Рис. 6. Масштабированные конечные разности
Fig. 6. Scaled finite differences
Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

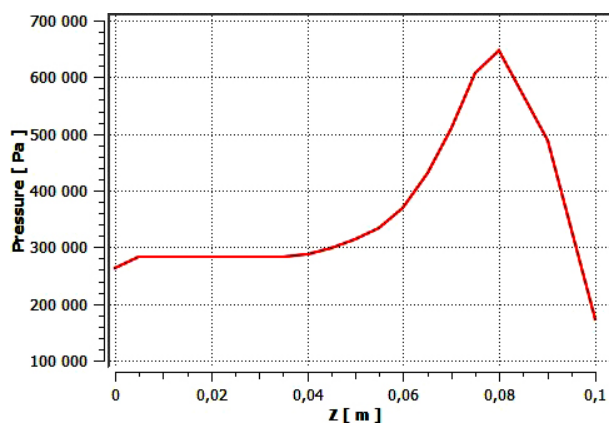


Рис. 7. Распределение давления по координате Z
для несоедшегося решения
Fig. 7. Pressure distribution along the Z coordinate
for a non-converged solution
Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

а не масштабированных конечных разностей, что позволяет констатировать сходимость решения за примерно 18 итераций, что даёт пятикратную экономию времени при максимальном количестве итераций равном 100.

Как было указано ранее, выбор модели плотности рабочей среды практически не влияет на распределение давлений в газовом слое при стационарном режиме. Однако в случае нестационарной задачи модель плотности существенно влияет на сходимость. Для исследования данного феномена выполнялось моделирование сжатия газового прямоугольного параллелепипеда, у которого торцевая стенка смещалась со скоростью 0,1 м/с. Для оценки сходимости анализировалась динамика изменения давления, плотности и температуры, а также требуемое количество итераций на каждом временном шаге. При настройках по умолчанию (временной шаг 0,1 с и 20 итераций на каждом шаге) сходимость при расчётах не достигалась. Более того, при увеличении количества итераций до 200 и даже до 500 не наблюдалось значимого снижения конечных разностей, и только при их дальнейшем увеличении сходимость достигалась. Отсюда можно сделать вывод, что требуется особая настройка критериев оценки сходимости, а также режима её отслеживания.

Тестовые расчёты выполнялись в основном при задании плотности воздуха по закону идеального газа. В случае задания плотности по закону сжимаемой жидкости скорость сходимости возрастала, и она достигалась за 571 итерацию. Исследования показали, что скорость сходимости определяется, прежде всего, величиной временного шага. Так, десятикратное уменьшение шага (до 0,01 с) приводило к достижению сходимости за несколько десятков итераций. Дополнительное уменьшение шага по времени уже не приводило к экономии вычислительных ресурсов: например, несмотря на то, что при каждом шаге в 0,001 с сходимость достигалась примерно за три итерации, их общее количество увеличивалось до 3267. При этом на каждом временном шаге происходит перестроение сетки расчётного домена, что приводит к дополнительным затратам общего расчётного времени.

В качестве фактора, заметно влияющего на сходимость вычислений, следует также отметить ре-

жим точности расчётов. При стандартной точности, используемой по умолчанию, сходимость итераций достигается гораздо медленнее, чем при выборе режима двойной точности (Double Precision). Данный режим является рекомендуемым при выполнении связанных расчётов, направленных на анализ процесса взаимодействия газового и твёрдого тела.

С целью анализа динамики скалярных значений, характеризующих свойства газового потока, были использованы дополнительные средства (мониторы), создаваемые в соответствующем разделе модуля Fluent (Solution → Monitors → Surface Monitors → Create). Для каждого монитора задавали способ вывода данных, выбирали отслеживаемую величину и зоны модели, в которых данная величина должна оцениваться. В стационарных задачах задавали количество итераций и параметры вывода текущих данных, характеризующих ход вычислений (например, частота вывода информации в консоль и на графики конечных разностей). При нестационарном расчёте в дополнение к упомянутым настройкам задавали временной шаг и количество таких шагов, суммарно определяющих продолжительность моделируемого переходного процесса.

Сравнение результатов расчётов, выполненных при различных исходных условиях, выполняли при помощи инструментов, встроенных в модуль Fluent и в среду Workbench. В противном случае требуется индивидуальная выгрузка результатов и их обработка во внешнем приложении. При использовании встроенного модуля постобработки CFD-Post выполняли отслеживание промежуточных результатов расчёта, которые позволяют анализировать особенности процесса вычислений ещё до его завершения. В качестве примера можно рассмотреть распределение давления вдоль осевой координаты z при недостаточном количестве выполненных итераций (рис. 7). Здесь можно отметить, что давления в газовом слое чрезмерны и не соответствуют ожидаемому распределению.

Приведённая здесь характеристика распределения давлений может в конечном итоге негативно сказаться на результатах связанного расчёта, поскольку при передаче нагрузок, создаваемых этим давлением, в модуль твердотельного моделирования (Transient Structural), реакция структуры будет некорректной. Соответственно, устойчивость связан-

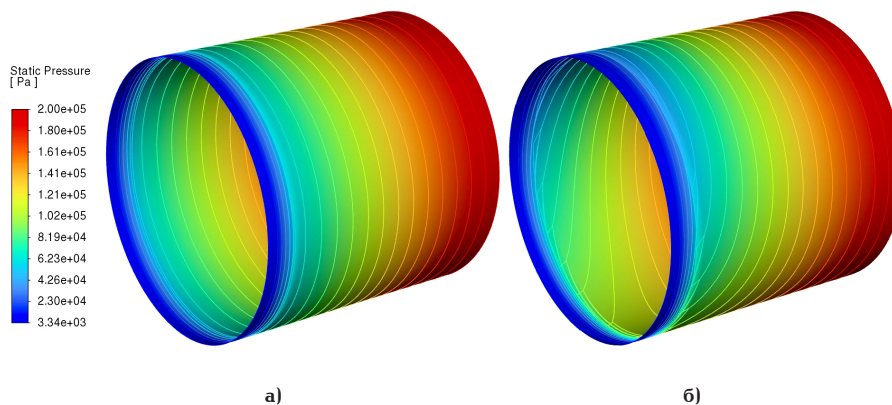


Рис. 8. Распределение давлений:
а) без эксцентриситета; б) с эксцентриситетом 15 мкм
Fig. 8. Pressure distributions:
а) without eccentricity; б) with an eccentricity of 15 μm

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

ного расчёта будет отсутствовать. Данный пример подчёркивает необходимость получения сошедшегося решения не только на каждом временном шаге, но и на каждой итерации связанного расчёта.

С использованием полученной модели газового слоя были выполнены расчёты домена, по результатам которых были построены контуры распределения давлений при сошедшемся решении (рис. 8).

При отсутствии эксцентриситета (рис. 8а) распределение давлений соответствует симметричной модели, при этом давление в зоне ступени составляет около 0,7 МПа. При смещении внутренней поверхности, формируемой цапфой вала на 15 мкм (максимально возможное смещение до контакта здесь составляет 20 мкм), давления перераспределяются (рис. 8б). При этом вертикальная реакция, действующая на цапфу, составляет 177 Н. Можно отметить, что полученные значения соответствуют ожидаемому результату.

Заключение

Представленное исследование демонстрирует, что традиционно используемые автоматические методы генерации расчётной сетки в модуле ANSYS Meshing не позволяют получить приемлемого результата в случае моделирования тонких ступенчатых газовых слоёв по причине нарушения структуры моделируемого объекта и невозможности выполнения расчётов во Fluent. В этом случае требуется специальный подход, исключающий возможность автоматического упрощения исходной геометрии газового слоя и формирование тетраэдрических элементов.

Исходная модель была преобразована в набор простых тел, что позволило получить качественно структурированную расчётную сетку, грани элементов которой ориентированы в основном перпендикулярно направлению газового потока. Выполненный анализ способов формирования интерфейсов между зонами показал неприемлемость типового определения контактных зон, однако был предложен метод настройки модели, позволяющий воспользоваться автоматическим распознаванием таких зон с получением проницаемых интерфейсов.

Расчёты, выполненные на полученной модели, продемонстрировали, что на скорость сходимости решения и на затраты машинного времени значительное влияние имеют особенности инициализации решения, настройка мониторинга крите-

риев сходимости, величина временного шага. Для моделей газовых слоёв рекомендовано снижение временного шага (до определённого уровня), оценка абсолютных значений конечных разностей, а также использование режима двойной точности. Сгенерированная сетка в совокупности с рекомендованными настройками расчётного модуля позволили получить корректное распределение давлений в ступенчатом слое, что открывает возможность дальнейшего использования модели в связанных расчётах.

В результате, разработана воспроизводимая методика получения конечно-элементной модели ступенчатой газостатической опоры, имеющая практическую значимость для задач проектирования и исследования газовых опор измерительного и диагностического оборудования.

Список источников / References

1. Gross W. A. Gas Film Lubrication. New York: John Wiley & Sons, 1962. 413 p.
2. Hamrock B. J. Fundamentals of Fluid Film Lubrication. New York: McGraw-Hill, 2004. 728 p. ISBN 9780203021187.
3. Шейнберг С. А. Газовая смазка подшипников скольжения // Трение и износ в машинах. 1953. № 8. С. 107–204. Sheynberg S. A. Gazovaya smazka podshipnikov skol'zheniya. *Treniye i Iznos v Mashinakh*. 1953;8:107–204. (In Russ.).
4. Castelli V., Pirvics J. Review of Numerical Methods in Gas Bearing Film Analysis. *Journal of Lubrication Technology*. 1968;90(4):777–790. <https://doi.org/10.1115/1.3601719>.
5. Табачников Ю. Б. Методика расчета плоских кольцевых газостатических опор с круговой микроканавкой и ее экспериментальная проверка // Машиноведение. 1974. № 1. С. 96–103. Tabachnikov Yu. B. Metodika rascheta ploskikh kol'tsevykh gazostaticheskikh opor s krugovoy mikrokanavkoy i ee eksperimental'naya proverka. *Mashinovedeniye*. 1974;1:96–103. (In Russ.).
6. Castelli V., Elrod H. G. Solution of the Stability Problem for 360 Deg Self-Acting, Gas-Lubricated Bearings. *Journal of Basic Engineering*. 1965;87(1):199–210. <https://doi.org/10.1115/1.3650508>.
7. Elrod H. G., McCabe J. T., Chu T. Y. Determination of Gas-Bearing Stability by Response to a Step-Jump. *Journal of Lubrication Technology*. 1967;89(4):493–498. <https://doi.org/10.1115/1.3617042>.
8. Stout K. J., Pink E. G. Orifice compensated EP gas bearings: the significance of errors of manufacture. *Tribology*

International. 1980;13(3):105–111. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(80\)90052-3](https://doi.org/10.1016/0301-679X(80)90052-3).

9. Kwan Y.-B. P., Post J. B. A tolerancing procedure for inherently compensated, rectangular aerostatic thrust bearings. *Tribology International*. 2000;33(8):581–585. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00109-2).

10. Tsai M. H., Hsu T. Y., Pai K. R., Shih M. Ch. Precision position control of pneumatic servo table embedded with aerostatic bearing. *Journal of System Design and Dynamics*. 2008;2(4):940–949. <https://doi.org/10.1299/jsdd.2.940>.

11. Chen D., Bian Ya., Fan J. Experiments and Identification of the Unbalance of Aerostatic Guideways on the Micro-Scale. *Sensors*. 2014;14(3):4416–4427. <https://doi.org/10.3390/s140304416>.

12. Ding J., Chang Y., Chen P. [et al.]. Dynamic modeling of ultra-precision fly cutting machine tool and the effect of ambient vibration on its tool tip response. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2020;2(2):025301. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab7b59>.

13. Leach R. K., Giusca C. L., Naoi K. Development and characterization of a new instrument for the traceable measurement of areal surface texture. *Measurement Science and Technology*. 2009;20(12):125102. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/12/125102>.

14. Thomsen-Schmidt P. Characterization of a traceable profiler instrument for areal roughness measurement. *Measurement Science and Technology*. 2011;22(9):094019. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094019>.

15. Lee K.-W., Noh Y.-J., Gao W. [et al.]. Experimental investigation of an air-bearing displacement sensor for on-machine surface form measurement of micro-structures. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2011;12(4):671–678. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0087-7>.

16. Lian H. Ch. Rong, Li Yu. Influence of operating temperature on the static characteristics of an externally pressurized thrust bearing lubricated with refrigerant gas. *Tribology Letters*. 2021;69:123. <https://doi.org/10.1007/s11249-021-01501-2>.

17. Lu Z.-W., Zhang J.-A., Liu B. Study on the gas film flow field and its influencing factors at the outlet of the orifice of the aerostatic bearing. *Shock and Vibration*. 2020;2020:8891382. <https://doi.org/10.1155/2020/8891382>.

18. Majumdar B. C. Zero-load stability of a rigid rotor supported on pressurized porous gas bearing. *Mechanism and Machine Theory*. 1977;12(4):303–310. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(77\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0094-114X(77)90006-4).

19. Chen M. F., Lin Y. T. Static behavior and dynamic stability analysis of grooved rectangular aerostatic thrust bearings by modified resistance network method. *Tribology International*. 2002;35(5):329–338. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00012-9).

20. Chen X.-D., He X.-M. The effect of the recess shape on performance analysis of the gas-lubricated bearing in optical lithography. *Tribology International*. 2006;39(11):1336–1341. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.10.005>.

21. Aoyama T., Kakinuma Y., Kobayashi Y. Numerical and experimental analysis for the small vibration of aerostatic guideways. *CIRP Annals*. 2006;55(1):419–422. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60449-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60449-1).

22. Zhu J., Chen H., Chen X. Large eddy simulation of vortex shedding and pressure fluctuation in aerostatic bearings. *Journal of Fluids and Structures*. 2013;40:42–51. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.03.012>.

23. Li Y., Lin Y., Zhu H., Sun Z. Research on the gas pressure fluctuation characteristics inside an aerostatic thrust bearing with a pocketed orifice-type restrictor. *Tribology Transactions*. 2014;57(1):28–35. <https://doi.org/10.1080/10402004.2013.840406>.

24. Ramachandra S. A Solution of Reynolds equation for a full finite journal bearing. *Journal of Basic Engineering*. 1961;83(4):589–593. <https://doi.org/10.1115/1.3662273>.

25. Pandian M. C. A new method for the numerical solution

of the Reynolds equation for gas-lubricated slider bearings. *Journal of Engineering Mathematics*. 1985;19:3–19. <https://doi.org/10.1007/BF00055036>.

26. Anaya-Dufresne M., Sinclair G. B. Some Exact Solutions of Reynolds Equation. *Journal of Tribology*. 1995;117(3):560–562. <https://doi.org/10.1115/1.2831292>.

27. Miyatake M., Yoshimoto Sh. Numerical investigation of static and dynamic characteristics of aerostatic thrust bearings with small feed holes. *Tribology International*. 2010;43(8):1353–1359. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.01.002>.

28. Зернин М. В. Проблемы и перспективы построения эффективного конечно-элементного описания течения масла в зазоре опор жидкостного трения с учетом неоднородного распределения температур и деформаций поверхностей // Проблемы трибологии. 1997. № 1. С. 73–78. EDN: UQYQFH.

Zernin M. V. Problemy i perspektivy postroyeniya effektivnogo konechnoelementnogo opisaniya techeniya masla v zazore opor zhidkostnogo treniya s uchedom neodnorodnogo raspredeleniya temperatur i deformatsiy poverkhnostey. *Tribology Problems*. 1997;1:73–78. EDN: UQYQFH. (In Russ.).

29. Chang S. H., Chan C. W., Jeng Y. R. Numerical analysis of discharge coefficients in aerostatic bearings with orifice-type restrictors. *Tribology International*. 2015;90:157–163. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.030>.

30. Chen Y. S., Chiu C. C., Cheng Y. D. Influences of operational conditions and geometric parameters on the stiffness of aerostatic journal bearings. *Precision Engineering*. 2010;34(4):722–734. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.04.001>.

31. Рыбкин Н. Н., Зернин М. В., Шилько С. В., Дробыш Т. В. Конечно-элементный анализ упругогидродинамического трения: учет деформаций деталей опор скольжения // Трение и износ. 2021. Т. 42, № 3. С. 254–267. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-3-254-267>. EDN: BGXNBN.

Rybkin N. N., Zernin M. V., Shil'ko S. V., Drobysht T. V. Finite Element Analysis of Elasto-Hydrodynamic Friction: Taking into Account the Deformations of Sliding Bearing Parts. *Friction and Wear*. 2021;42(3):254–267. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-3-254-267>. EDN: BGXNBN. (In Russ.).

32. Брунгардт М. В., Вавилов Д. В., Лукин Р. С. [и др.]. Численное исследование переходных процессов в самоуставляющейся адаптивной гидростатической опоре // Технология машиностроения. 2016. № 2. С. 49–53. EDN: WAONYB.

Brungardt M. V., Vavilov D. V., Lukin R. S. [et al.]. Chislennoye issledovaniye perekhodnykh protsessov v samoustanavlivayushchey adaptivnoy gidrostaticheskoy opore. *Tekhnologiya Mashinostroyeniya*. 2016;2:49–53. EDN: WAONYB. (In Russ.).

33. Wang W., Cheng X., Zhang M. Effect of the deformation of porous materials on the performance of aerostatic bearings by fluid-solid interaction method. *Tribology International*. 2020;150:106391. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106391>.

34. Gao Q., Chen W., Lu L. [et al.]. Aerostatic bearings design and analysis with the application to precision engineering: State-of-the-art and future perspectives. *Tribology International*. 2019;135:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.020>.

35. Gao Q., Lu L., Chen W. [et al.]. A novel modeling method to investigate the performance of aerostatic spindle considering the fluid-structure interaction. *Tribology International*. 2017;115:461–469. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.016>.

Информация об авторе:

КУРЗАКОВ Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Сибирского федерального университета, г. Красноярск.

SPIN-код: 4977-0192

AuthorID (РИНЦ): 361924

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3819-9743>

AuthorID (SCOPUS): 55850380100

ResearcherID: OYD-6605-2025
e-mail: kurzakov@list.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 06.12.2025; одобрена после рецензирования 13.04.2026; принята к публикации 08.06.2026.

Information about the author:

KURZAKOV Andrey Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Design and Technological Support

for Mechanical Engineering Production Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

SPIN-code: 4977-0192

AuthorID (RSCI): 361924

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3819-9743>

AuthorID (SCOPUS): 55850380100

ResearcherID: OYD-6605-2025

e-mail: kurzakov@list.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The article was submitted 06.12.2025; approved after reviewing 13.04.2026; accepted for publication 08.06.2026.

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГОЛОВОК ДЛЯ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ

Е. В. Леун 

АО «НПО Лавочкина», Россия, 141402, г. Химки, ул. Ленинградская, 24

 stankin1999@mail.ru

Статья направлена на рассмотрение возможностей и поиска новых путей конструктивного совершенствования контактных измерительных головок для высокоточного 3D-контроля геометрических параметров сложных изделий на координатных измерительных машинах. Рассмотрены технические решения на основе оптических методов и средств измерений, в частности волоконно-оптических датчиков.

В статье обсуждаются два типа контактных измерительных головок с жестким и подвижным измерительным штоком. Рассматриваются особенности двух вариантов измерительных головок первого типа, реализованных на основе измерений микроизгибов измерительного штока посредством встроенных в него датчиков с волоконными брэгговскими решетками или волоконных интерферометрических датчиков. Также обсуждаются варианты второго типа измерительных головок с подвижным измерительным штоком и измерением его смещений при касании с контролируемой деталью на основе использования оптоволоконного сканера или трехкоординатного волоконного интерферометрического датчика.

Показано, что в последнем варианте порог чувствительности по трем осям потенциально может иметь субмикрометрические значения. Обсужден вариант встраивания миниатюрной широкоугольной видеокамеры Fisheye «Рыбий глаз» для визуализации приближения измерительного наконечника к контролируемой детали за счет регистрации и измерений геометрических параметров формируемых колец Ньютона.

Ключевые слова: координатная измерительная машина, измерительная головка, измерительный наконечник, измерительный шток, волоконный интерферометрический датчик, лазерный интерферометр, кольца Ньютона

Для цитирования: Леун Е. В. Физико-технические основы совершенствования контактных измерительных головок для координатных измерительных машин на основе волоконных датчиков. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 112–121. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-112-121>. EDN: FZSWXF.



© Леун Е. В., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PHYSICAL AND TECHNICAL PRINCIPLES OF IMPROVING CONTACT MEASURING HEADS FOR COORDINATE MEASURING MACHINES BASED ON FIBER SENSORS

Е. V. Leun 

Lavochkin Association, Leningradskaya St., 24, Khimki, 141402, Russia

 stankin1999@mail.ru

The article aims at considering the possibilities and finding new ways to constructively improve contact measuring heads for high-precision 3D control of geometric parameters of complex products on coordinate measuring machines. Technical solutions based on optical methods and measuring instruments, in particular, fiber-optic sensors are also considered.

The article discusses two types of contact measuring heads with rigid and movable measuring rods. The features of two variants of measuring heads of the first type are considered, implemented on the basis of measurements of micro bends of the measuring rod by means of sensors with fiber Bragg gratings or fiber interferometric sensors built into it. Options for the second type of measuring heads with a movable measuring rod and measuring its displacements when touching a controlled part based on the use of a fiber-optic scanner or a three-axis fiber interferometric sensor are also discussed.

It is shown that in the latter case, the sensitivity threshold along three axes can potentially have subpicometric values. The option of embedding a miniature wide-angle Fisheye video camera to visualize the approximation of the measuring tip to the controlled part by recording and measuring the geometric parameters of the formed Newton rings is discussed.

Keywords: coordinate measuring machine, measuring head, measuring tip, measuring rod, fiber interferometric sensor, laser interferometer, Newton rings

For citation: Leun E. V. Physical and technical principles of improving contact measuring heads for coordinate measuring machines based on fiber sensors. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):112–121. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-112-121>. EDN: FZSWXF. (In Russ.).



© Leun E. V., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Достижение технологического суверенитета России за счет импортозамещения в машино-, станко- и приборостроении, обеспечивающих успешное развитие ракетно-космической техники, проблематично без высокоточного 3D-контроля геометрических параметров изделий. Такой контроль в основном реализуется координатными измерительными машинами (КИМ), одним из основных элементов которых являются контактные (ощупывающие, тактильные) измерительные головки (в дальнейшем — ИГ). Несмотря на применение оптических систем для бесконтактного 3D-контроля размеров изделий, развитие ИГ по-прежнему является актуальной задачей¹ [1–7].

Традиционно контактные ИГ совершенствовались в части схем формирования и преобразования оптических или электрических сигналов, создаваемых при касании с деталью измерительного наконечника, установленного на штоке (рис. 1). Измерительный наконечник рассматривался как механическое передаточное звено, но уже в гибридной ИГ [7] измерительный наконечник, реализованный на основе высокопрочных и прозрачных корундов, является элементом оптической системы. Потенциал таких усовершенствований еще не полностью раскрыт.

Современные разработки высокоточной измерительной техники открывают новые возможности совершенствования ИГ. К настоящему времени достигнут прогресс в разных направлениях волоконной техники: в схематехнике и функциональных возможностях волоконных датчиков, в способах измерения удлинений оптических волокон при микроизгибах [8, 9], в круговом сканировании светом с помощью миниатюрных пьезоволоконных сканеров [10–14] и т. д. Кроме того, разрешающая способность лазерных интерферометров приблизилась к субпикометрическим значениям [15–18], позволяя реализовать высокоточные волоконные интерферометрические датчики (ВИД) смещений. Все это создает задел для разработки новых ИГ.

Вопросы совершенствования ИГ на основе использования современных высокоточных лазерных и волоконно-оптических измерительных устройств в полной мере не были представлены в открытой печати и данная статья направлена на восполнение этого пробела.

ИГ с жестким измерительным штоком и встроенными в него волоконными датчиками измерений микроизгибов

В данном разделе рассмотрены особенности ИГ со встроенными в измерительный шток датчиками с волоконными брэгговскими решетками (ВБР) или ВИД. Проведена оценка порога чувствительности таких ИГ.

Конструкция и принцип действия контактной ИГ с жестким измерительным штоком и встроенными в него волоконными датчиками измерений микроизгибов

В данных ИГ вдоль измерительного штока установлены оптические волокна, выполняющие функцию элементов, чувствительных к микроизгибам, подобно тензорезисторам. Касание, прижатие измерительного наконечника с деталью приводит к его микросмещениям $\Delta l_{\text{см}}$ и микроизгибу измерительного штока (рис. 2а) и деформациям в виде удлинений соответствующих оптических волокон $\Delta l_{\text{ов}}$ с возможностью последующих измерений и формирования выходных сигналов.

Далее рассмотрены особенности измерений удлинений $\Delta l_{\text{ов}}$ от микроизгибов путем контроля сдвига центральной (резонансной) длины волны ВБР $\lambda_{\text{в}}$, а также напрямую при контроле длины измерительного канала интерферометра, включающего оптическое волокно.

На рис. 2б,в показаны варианты расположения волокон в виде четырех плеч (чувствительных участков, выделены разными цветами), формируя в поперечном сечении крестообразную структуру.

Каждое измерительное плечо состоит из двух «незамкнутых витков» волокон, уложенных «змейкой» в одной плоскости, чувствительных к изгибам

¹ Знакомьтесь: Blum. Обзор измерительных систем компании «Блюм». URL: <https://www.incore.ru/articles/osnastka-i-komplektuyushchie-/znakomtes-blum-obzor-izmeritelnykh-sistem-kompanii-blyum-/> (дата обращения: 09.04.2026).



Рис. 1. Измерение размеров деталей с помощью контактной ИГ [1]

Fig. 1. Measuring the dimensions of parts using a contact measuring head [1]

в одной плоскости. Внутренне свободное пространство измерительного штока залито компаундом, фиксирующим волокна.

В соответствии с такой конструкцией минимальный внешний диаметр измерительного штока $d_{шт1}$ будет определяться толщиной стенки $l_{ст}$, количеством витков волокон в плече n_v и толщиной волокна, с учетом его защитно-упрочняющего покрытия $d_{зуп}$:

$$d_{шт1} = 2l_{ст} + 2n_v d_{зуп}. \quad (1)$$

Можно использовать два витка с четырьмя участками волокна оптического одномодового радиационно стойкого с нелегированной сердцевинной, с материалом защитно-упрочняющего покрытия из меди SMSC125Cu (99,997 %) и алюминия SMSC125Al (99,999 %), имеющего внешний диаметр $d_{зуп} = 160$ мкм [12]. Тогда при толщине стенки $l_{ст} = 0,2$ мм минимальный внешний диаметр измерительного штока составит $d_{шт1} = 1,85$ мм, а измерительного наконечника — $d_{ин} = 2$ мм.

Контроль микроизгибов

измерительного штока датчиками с ВБР

В данных ИГ центральная (резонансная) длина волны ВБР $\lambda_{ов}$ зависит от эффективного показателя преломления сердцевинны световода и периода модуляции показателя преломления, которые, в свою очередь, зависят от внешней деформации волокна $\Delta l_{ов}$. Зависимость смещения центральной длины волны отражения $\Delta \lambda_{ов}$ от внешней деформации волокна $\Delta l_{ов}$ определяется выражением [7]:

$$\Delta \lambda_{ов} = 2 \left(\Lambda \frac{dn_{eff}}{dl} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dl} \right) \Delta l_{ов}, \quad (2)$$

где n_{eff} — эффективный показатель преломления сердцевинны волокна для центральной длины волны; Λ — период брэгговской решётки.

Для измерений используется спектроанализатор, определяющий сдвиг длин волн $\Delta \lambda$. В настоящее время для стандартного одномодового оптического волокна при длине волны отражения ВБР ≈ 1550 нм расчётная чувствительность к деформации составляет 1,2 пм [8].

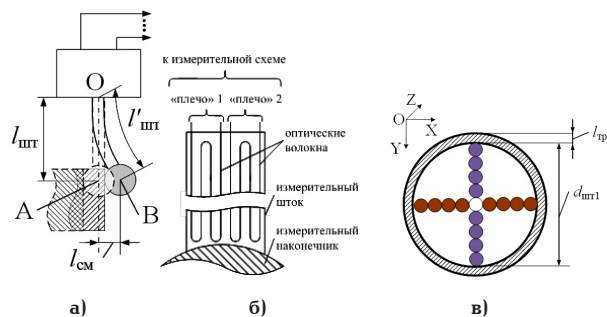


Рис. 2. Изгиб штока измерительной головки при касании с деталью (а) и ее эквивалентная схема (б); крестообразное расположение оптических волокон в измерительном штоке (в)

Fig. 2. Bending of the measuring head rod in contact with the part (a) and its equivalent circuit (b); the cross-shaped location of optical fibers in the measuring rod (v)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Контроль микроизгибов измерительного штока с ВИД

В основе ВИД лежит применение высокоточных лазерных интерферометров, в оптическом измерительном канале которого введено оптическое волокно, выполняющее функции чувствительного элемента или доставки оптического² излучения к объекту контроля и назад. Удлинения оптического волокна $\Delta l_{ов}$ приводят к фазовому сдвигу световых волн, определяемых для четырех плеч оптического волокна $\Delta l_{ов}$ выражением:

$$\Delta \varphi = 8\pi \frac{\Delta l_{ов}}{\lambda}, \quad (3)$$

где λ — длина света.

Примерно к 2010 г. разрешающая способность лазерных интерферометров уже достигла субмикрометрических значений [10, 11], позволяя допустить достижение к настоящему времени порога чувствительности ВИД $\Delta l_{вид} = 0,4$ пм, используемое далее в расчетах.

Определение оценки порога чувствительности

Определить оценку порога чувствительности двух ИГ можно упрощенно, принимая геометрическую схему (рис. 2а), согласно которой треугольник ОАВ является прямоугольным, и из-за малых смещений $\Delta l_{см}$ гипотенузу [ОВ] можно соотнести изогнутому штоку $l'_{шт}$, записывая выражения:

— для абсолютного удлинения штока $\Delta l_{шт}$:

$$\Delta l_{шт} \approx l'_{шт} - l_{шт} = \sqrt{l_{шт}^2 + \Delta l_{см}^2} - l_{шт}; \quad (4)$$

— для относительного удлинения штока δ_1 :

$$\delta_1 \approx \frac{\Delta l_{шт}}{l_{шт}} = \frac{\sqrt{l_{шт}^2 + \Delta l_{см}^2} - l_{шт}}{l_{шт}} = \frac{\sqrt{l_{шт}^2 + \Delta l_{см}^2}}{l_{шт}} - 1, \quad (5)$$

где $l_{шт}$ — начальная длина штока, перед касанием с деталью.

При использовании четырех плеч оптических волокон для абсолютных удлинений штока $\Delta l_{шт}$

² Оптическое волокно. URL: https://disk.pnpk.ru/d/s/12oVTccQihxFARcqiTCxON2OEFkmAUz/6G0r_0lruzbcLieCzaYEKjvuAcp6b3f2-8LsAv_EnLQw (дата обращения: 09.04.2026).

можно применить упрощенную формулу (для значения «с запасом»):

$$\Delta l_{шт} \approx 4\Delta l_{ов}. \quad (6)$$

Тогда с учетом этой формулы из выражения (4) можно получить уравнение для оценки порога чувствительности ИГ, например, вдоль одной оси X $\Delta l_{шт1x}$, соответствующей смещению $\Delta l_{см}$: $\Delta l_{см} = \Delta l_{шт1x}$, зависящей от порога чувствительности волоконных датчиков в штоке,

$$\begin{aligned} \Delta l_{шт1x} &\approx \sqrt{(\Delta l_{шт} + l_{шт})^2 - l_{шт}^2} = \\ &= \sqrt{(4\Delta l_{ов} + l_{шт})^2 - l_{шт}^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Суммарный порог чувствительности ИГ будет зависеть от порогов чувствительности по двум осям, а выражение для его расчета, при условии равенства двух составляющих $\Delta l_{шт1x} = \Delta l_{шт1y}$ независимых друг от друга и распределенных по нормальному закону, принимает вид:

$$\begin{aligned} \Delta l_{шт1} &\approx \sqrt{\Delta l_{шт1x}^2 + \Delta l_{шт1y}^2} = \\ &= \Delta l_{шт1x} \sqrt{2} \approx 1,4 \cdot \Delta l_{шт1x}, \end{aligned} \quad (8)$$

меняя также и выражение (7)

$$\begin{aligned} \Delta l_{шт1} &\approx 1,4 \sqrt{(4\Delta l_{ов} + l_{шт})^2 - l_{шт}^2} = \\ &= 1,4 \cdot l_{шт} \sqrt{\left(\frac{4\Delta l_{ов}}{l_{шт}} + 1\right)^2 - 1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Анализ долговечности оптических волокон при их удлинении

Вопрос долговечности оптических волокон при небольших удлинении на уровне упругих деформаций рассматривался ранее в [13]. Было показано, что при оценке долговечности следует учесть, что прочность бездефектного кварцевого волокна выше прочности стальной проволоки такого же диаметра, однако любой контакт поверхности волокна с твердым предметом или даже частицей пыли, находящейся в воздухе, приводит к появлению на поверхности стекла микротрещин, которые при приложении растягивающей нагрузки начинают быстро расти. В результате разрывная прочность кварцевых волокон оказывается намного ниже теоретического предела прочности кварцевого стекла.

Согласно [13], время до разрушения t_p от нагрузки σ_s имеет экспоненциальную зависимость

$$t_p = t_o \cdot \exp\left(\frac{U_0}{R \cdot T'} \left(1 - \frac{\sigma_s}{S_{ю}}\right)\right), \quad (10)$$

где t_o — величина, приблизительно равная периоду тепловых колебаний атомов (~10–13 сек); U_0 — энергия ненагруженной Si-O-связи (~110 ккал/моль); R — газовая постоянная; T' — температура; $S_{ю}$ — прочность в отсутствии термофлуктуационного роста дефектов.

При этом время жизни оптического волокна $t_{ов}$ при статической нагрузке σ_s , равной разрывной прочности, в $(n_{ов} + 1)$ раз короче, чем при динамической σ_d (при $\sigma_s = \sigma_d$). Параметр статической усталости n как наклон графика статической усталости в логарифмических координатах записывается в виде

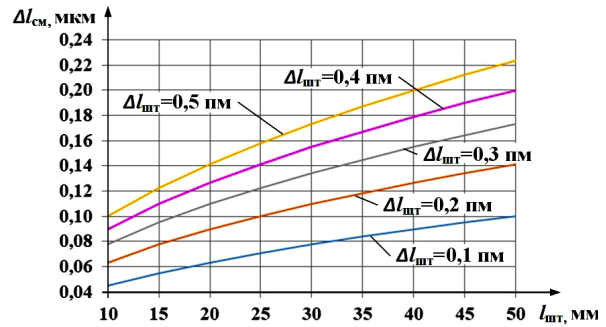


Рис. 3. Графики зависимостей порога чувствительности ИГ $\Delta l_{см}$ от длины штока $l_{шт}$ для разных значений порога чувствительности волоконных датчиков $\Delta l_{ов}$ при условии использования четырех плеч оптических волокон

Fig. 3. Graphs of the dependence of the sensitivity threshold of the measuring head $\Delta l_{см}$ on the length of the measuring rod $l_{шт}$ for different values of the sensitivity threshold of fiber sensors $\Delta l_{ов}$ under the condition of using four arms of optical fibers

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

$$n_{ов} = -\frac{d \ln(t_p)}{d \ln(\sigma_s)} = \frac{U_0}{RT'} \cdot \frac{\sigma_s}{S_{ю}}. \quad (11)$$

В интересном с практической точки зрения интервале от 1 секунды до 30 лет он успевает снизить всего лишь со 155 до 135, подтверждая возможность длительной работы оптических волокон при удлинении на уровне упругих деформаций.

Анализ ИГ с жестким штоком

С помощью полученного ранее уравнения (6) были рассчитаны значения порога чувствительности ИГ $\Delta l_{шт}$ для длин штока $l_{шт}$ от 10 до 50 мм с шагом 5 мм при использовании четырех плеч оптических волокон и разных значений порога чувствительности волоконных датчиков $\Delta l_{ов}$ в диапазоне от 0,1 до 0,5 нм с шагом 0,1 нм. Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 3.

При использовании в ИГ датчика на основе ВБР с порогом чувствительности $\Delta l_{вбр} = 1,6$ нм минимальные удлинения четырех плеч оптических волокон составят $\Delta l_{ов} = 0,4$ нм, что при длине штока 30 и 50 мм приведет к одноосевому порогу чувствительности ИГ $< 0,16$ и $0,2$ мкм соответственно. Для двух осей суммарный порог чувствительности ИГ $\approx 0,22$ и $0,28$ мкм соответственно.

Для ИГ с ВИД достигим порог чувствительности $\Delta l_{вид} = 0,4$ нм, обуславливая минимальные удлинения четырех плеч оптических волокон $\Delta l_{ов} = 0,1$ нм, что при длине штока 30 и 50 мм приведет к одноосевому порогу чувствительности ИГ $< 0,08$ и $0,1$ мкм соответственно. Для двух осей суммарный порог чувствительности ИГ $\approx 0,11$ и $0,14$ мкм соответственно. Таким образом, при использовании ВИД достигим более низкий порог чувствительности, а лазерные интерферометры уже достаточно отработаны, позволяя изготавливать их в интегральном оптическом исполнении.

Недостатком рассматриваемых конструкций ИГ является то, что они «слепы» и не могут визуализировать окружающее пространство вокруг измерительного наконечника, не позволяя определить приближение к детали. Однако они относительно просты и позволяют получить неплохие характеристики.

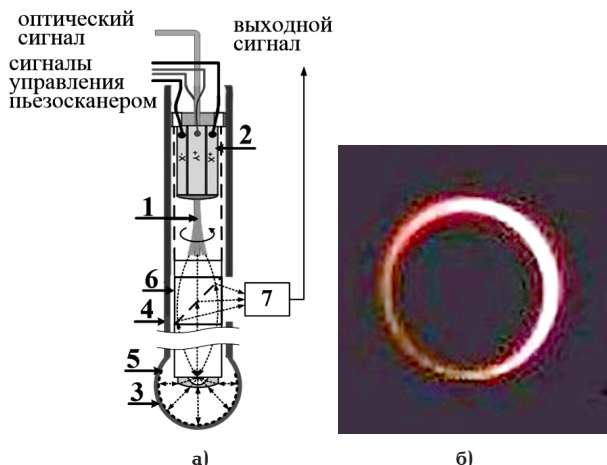


Рис. 4. ИГ на основе пьезоволоконного сканера:
а) схема: 1 — подвижное волокно, 2 — пьезопровод, 3 — измерительный наконечник, 4 — подвижный измерительный шток, 5 — внутреннее отражающее покрытие, 6 — оптическая система, 7 — видеокамера;
б) фото траектории движения лазерного луча в виде фигуры Лиссажу [10]

Fig. 4. Measuring head based on a piezo-fiber scanner:
a) diagram: 1 — movable fiber, 2 — piezo actuator, 3 — measuring tip, 4 — movable measuring rod, 5 — internal reflective coating, 6 — optical system, 7 — video camera;
b) photo of the trajectory of the laser beam in the form of a Lissajous figure [10]

Особенности ИГ

с подвижным измерительным штоком

В разделе обсуждаются физико-технические особенности ИГ, реализованные на основе оптоволоконного пьезосканера и двух вариантов трехкоординатных ВИД, в том числе с возможностью визуализации.

ИГ при использовании

оптоволоконного пьезосканера

Рассмотрим возможности построения ИГ на основе оптоволоконного пьезосканера (рис. 4а), представленного в публикациях [10–14]. Его принцип действия основан на круговом вращении участка

излучающего волокна цилиндрическим двухкоординатным пьезопроводом и формировании выходящего луча света с контуром конуса (вид сбоку) и окружности, фигуры Лиссажу (фронтальный вид, рис. 4б). Если внутренняя поверхность покрыта отражающим покрытием, то оптический поток на выходе вращающегося световода отражается в обратном направлении, позволяя осуществлять измерения положения подвижного измерительного штока.

Минимальный радиус изгиба участка волокна $r_{\text{в}}$ длиной $l_{\text{в}}$ можно рассчитать, используя данные по изгибу подвижного отрезка световода [19], по формуле

$$r_{\text{ов}} = \frac{l_{\text{овл}} \cdot 360^\circ}{2\pi\alpha_1} = \frac{l_{\text{овл}}}{\alpha_2}, \quad (12)$$

где α_1 и α_2 — углы отклонения конца волокна в градусах и радианах соответственно. Для экспериментального образца, бездефектно проработавшего непрерывно в течение 3377 часов, с параметрами $l_{\text{овл}} = 4,3$ мм и $\alpha_1 = 50^\circ$ [9], получаем $r_{\text{в}} = 4,9$ мм ≈ 5 мм. Полученные значения соответствуют допустимым значениям по динамической нагрузке пьезоволоконного сканера.

ИГ на основе трехкоординатного ВИД смещений

В одном из вариантов оптическая часть данной ИГ (рис. 5а,б) включает гибкий полый шток 1, выполненный в виде упругого элемента с установленным на его конце измерительного наконечника в виде высокопрочной сферической оболочки 2 с внутренним отражающим покрытием 3, неподвижный шток 4, трехкоординатный ВИД смещений, включающий три датчика ВИД_x, ВИД_y, 6 и ВИД_z 7 для измерений смещений I_x , I_y и I_z вдоль осей ОХ, ОУ и ОZ соответственно. Эти три датчика оптически связаны с трехканальным лазерным интерферометром (на рис. 5 не показан), осуществляющим измерения смещений I_x , I_y и I_z .

На торцах волокон трех ВИД установлены концевые микролинзы [20, 21] или микрооптические системы для коллимации оптического потока.

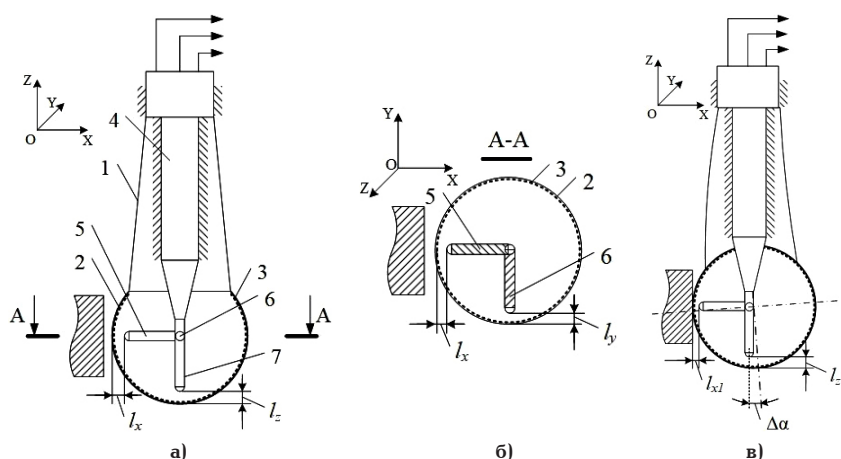


Рис. 5. Конструкция ИГ на основе волоконного интерферометрического датчика смещений: а) вид сбоку: 1 — подвижный шток, 2 — сферическая оболочка, 3 — отражающее покрытие, 4 — неподвижный шток, 5–7 — три датчика ВИД_x, 5, ВИД_y, 6 и ВИД_z 7; б) вид сверху; в) при отклонении измерительного наконечника в процессе касания с деталью

Fig. 5. Design of the measuring head based on a fiber interferometric displacement sensor:
a) side view: 1 — movable rod, 2 — spherical shell, 3 — reflective coating, 4 — fixed rod, 5–7 — three fiber interferometric sensors for ВИД_x, 5, ВИД_y, 6 and ВИД_z 7;

б) top view; в) when the measuring tip is deflected in the process of touching the part

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

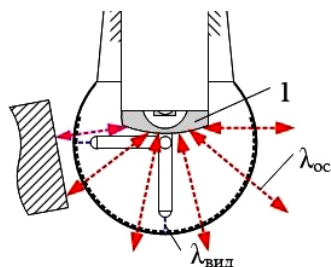


Рис. 6. Конструкция ИГ на основе волоконного интерферометрического датчика смещений при касании с деталью

Fig. 6. Design of the measuring head is based on a fiber interferometric displacement sensor in contact with the product
Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

На внутреннюю сторону сферической оболочки нанесено отражающее покрытие 3, а формирующиеся зазоры между ним и волокнами в итоге являются частями измерительных каналов трехканального лазерного интерферометра.

Перед измерениями ИГ калибруется, определяя начальные значения зазоров вдоль осей ОХ, ОУ и ОZ. Далее в процессе измерений ИГ подводится к детали и при касании с ней подвижный наконечник отклоняется от своего начального положения. При регистрации искомого трехкоординатных смещений ΔI_x , ΔI_y и ΔI_z осуществляется факт касания измерительного наконечника с деталью, по значениям которых косвенно определяется координата касания и суммарное значение отклонения $\Delta I_{иг2}$:

$$\Delta I_{иг2} = \sqrt{\Delta I_{иг1 x}^2 + \Delta I_{иг1 y}^2 + \Delta I_{иг1 z}^2}. \quad (13)$$

ИГ на основе трехкоординатного ВИД смещений с возможностью визуализации

Конструкция и принцип действия данной ИГ во многом подобны предыдущему типу ИГ (рис. 6). Нововведение заключается в добавлении подсветки и видеокамеры с широкоугольной оптической системой Fisheye «Рыбий глаз» (в дальнейшем — оптическая система) 1 с возможностью расширения поля зрения почти до $180^\circ \times 180^\circ$.

Для совместной работы трехкоординатного ВИД смещений и оптической системы в ИГ применено спектральное разнесение их оптических потоков с реализацией дихроичного зеркала (отражателя) [17]. Для этого на внутреннюю поверхность измерительного наконечника вместо отражающего наносят специальное покрытие, реализующее оптический фильтр типа «Longpass» с коэффициентом пропускания k_{np} , подчиняющимся следующему условию:

$$\begin{cases} k_{\max}, & \text{при } \lambda \geq \lambda_{гр}; \\ k_{\min}, & \text{при } \lambda < \lambda_{гр}; \end{cases} \quad (14)$$

где $\lambda_{гр}$ — граничная длина волны, разделяющая диапазон длин волн оптических потоков на два поддиапазона: с высоким пропусканием и высоким пода-

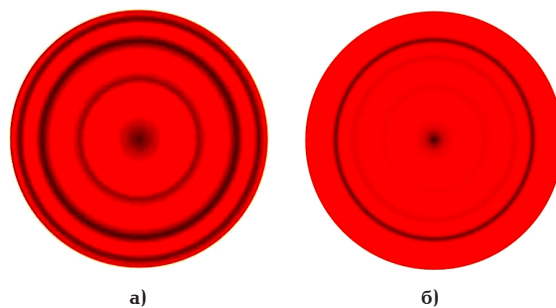


Рис. 7. Кольца Ньютона при монохроматическом красном освещении (а) и муаровое кольцо, полученное при двухдлинноволновом освещении (б)

Fig. 7. Newton's rings under monochromatic red illumination (a) and the Moire ring obtained under two-wavelength illumination (b)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

влением для оптической системы и ВИД смещений соответственно.

В настоящее время эта технология уже хорошо отработана и значение граничной длины волны $\lambda_{гр}$ может находиться вблизи границы видимого и инфракрасного диапазонов длин волн, например, $0,71 - 0,8$ мкм, а значения $k_{\max}$ и $k_{\min}$ может быть более 90 % и менее 0,5 %³. Для такого варианта удобна рабочая длина волны трехкоординатного ВИД смещений $\lambda_{вид} = 0,63$ мкм, а оптической системы — $\lambda_{ос} = 1,5$ мкм. И тогда в первом случае дихроичное покрытие будет отражающим, а во втором — пропускающим.

В процессе работы излучение оптической системы освещает окружающее пространство измерительного наконечника. При близком приближении его к детали освещающий когерентный оптический поток отражается в обратном направлении и из-за формирующегося клиновидного воздушного зазора между деталью и измерительным наконечником на последнем создается изображение в виде кольцевой интерференционной картины с периодическими повторяющимися концентрическими темными и светлыми полосами, представляющими так называемые кольца Ньютона. Частичное попадание элементов ВИД в поле зрения оптической системы не будет критичным из-за их малости и возможности дополнительной алгоритмической обработки по реконструкции изображения.

Значения радиусов n темных колец Ньютона в отраженном свете r_{mn} зависят от длины волны света оптической системы $\lambda_{ос}$, радиуса измерительного наконечника $R_{ин}$, зазора I_3 , и определяются выражением:

$$r_{mn}^2 = nR_{ин}\lambda - 2R_{ин}I_3, \quad (15)$$

где $n = 0, 1, 2 \dots$ — порядки колец Ньютона.

Регистрация и измерение радиусов темных колец и их пространственного положения в пределах поля зрения оптической системы позволяет получить информацию о положении измерительного наконечника ИГ относительно детали, а именно минимальном зазоре I_3 (по перпендикуляру к детали) пространственном положении точки контакта (при его наличии) и их изменений в динамике.

Определим значения радиусов при касании измерительного наконечника с деталью $l_3 = 0$. Для длины волны $\lambda = 1,5$ мкм и радиуса наконечника $R_{ин} = 1,5$ мм значения радиусов первого $r_{т1}$ ($n = 1$) и второго $r_{т2}$ ($n = 2$) темных колец Ньютона (рис. 7а):

$$r_{т1} = \sqrt{R_{ин}\lambda} = \sqrt{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} \approx 47,43 \text{ мкм};$$

$$r_{т2} = \sqrt{2R_{ин}\lambda} = \sqrt{R_{ин}\lambda} \cdot \sqrt{2} \approx 47,43 \cdot 10^{-6} \cdot 1,4 \approx 66,88 \text{ мкм},$$

расстояние (шаг) между ними $r_{т21}$:

$$r_{т21} = r_{т2} - r_{т1} \approx 19,45 \text{ мкм}.$$

У современных матричных оптико-электронных приемников размер пикселя уже минимизирован до $0,4 - 0,56$ мкм^{4,5}.

Такие характеристики позволяют реализовать возможности встроенного малогабаритного микроскопа, позволяющего осуществлять видеоизмерительные операции с изображениями вышеуказанных расчетных размеров. Примером этого может быть портативный микроскоп для смартфона iMicro Q2 с увеличением до 800 раз, диаметром ≈ 10 мм, толщиной 3,2 мм, весом всего 0,5 гр⁶.

Внешнюю трехмерную полусферическую поверхность измерительного наконечника, освещаемую оптической системой, на плоскости можно представить в виде круга диаметром

$$d_{кр} = 2R_{ин}. \quad (16)$$

Для $R_{ин} = 1,5$ мм получаем диаметр кругового поля обзора $d_{кр} = 9,42$ мм.

Рассмотрим алгоритмы расчетов двух групп параметров, связанных с зазором и пространственным положением точки касания, которые могут быть базовыми при обработке данных, полученных при визуализации колец Ньютона.

Значения зазора l_3 в момент времени t_1 можно определить на основе формулы (15), измеряя радиусы нескольких темных колец Ньютона $r_{т1}(t_1)$, $r_{т2}(t_1) \dots r_{тm}(t_1)$:

$$\begin{cases} l_{31}(t_1) = \frac{R_{ин}\lambda - r_{т1}^2(t_1)}{2R_{ин}} = \frac{\lambda}{2} - \frac{1}{2R_{ин}} r_{т1}^2(t_1); \\ l_{32}(t_1) = \frac{2R_{ин}\lambda - r_{т2}^2(t_1)}{2R_{ин}} = \lambda - \frac{1}{2R_{ин}} r_{т2}^2(t_1); \\ l_{3n}(t_1) = \frac{nR_{ин}\lambda - r_{тn}^2(t_1)}{2R_{ин}} = \frac{n\lambda}{2} - \frac{1}{2R_{ин}} r_{тn}^2(t_1). \end{cases} \quad (17)$$

Усреднением нескольких полученных значений $l_{31}(t_1)$, $l_{32}(t_1) \dots l_{3m}(t_1)$ уменьшается случайная составляющая измерений зазора:

$$\overline{l_3(t_1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_{3i}(t_1). \quad (18)$$

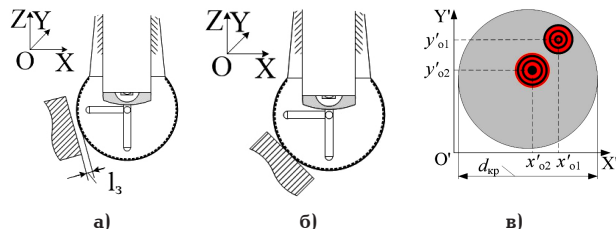


Рис. 8. Взаимное расположение ИГ относительно детали: а) при бесконтактном «ощупывании» детали с зазором l_3 ; б) при касании детали; в) изображения колец Ньютона при «бесконтактном «ощупывании» и касании с деталью
Fig. 8. Relative position of the measuring head relative to the part: а) during non-contact "groping" of the part with a gap l_3 ; б) when touching the part; в) images of Newton's rings during "non-contact" groping and touching with the part
Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Аналогично определяются значения радиусов нескольких темных колец Ньютона в момент времени t_2 : $r_{т1}(t_2)$, $r_{т2}(t_2) \dots r_{тm}(t_2)$, вычисляются значения зазора $l_{31}(t_2)$, $l_{32}(t_2) \dots l_{3m}(t_2)$, рассчитывая среднее арифметическое значение нового зазора в момент времени t_2 : $\overline{l_3(t_2)}$. С учетом полученных данных для измерительного наконечника определяются значения следующих параметров:

– смещений (для бесконтактного грубого ощупывания) $\Delta l_{ин}$:

$$\Delta l_{ин} = \overline{l_3(t_2)} - \overline{l_3(t_1)}; \quad (19)$$

– скорости сближения (удаления) с деталью $v_{ин}$:

$$v_{ин} = \frac{\Delta l_{ин}}{\Delta t} = \frac{\overline{l_3(t_2)} - \overline{l_3(t_1)}}{\Delta t}. \quad (20)$$

Вторая группа параметров связана с пространственным положением точки касания, которое можно определить также на основе уравнения (15) при условии $l_3 = 0$. В основе этих расчетов лежит алгоритм «привязки» полусферической системы координат измерительного наконечника к локальной прямоугольной (декартовой) системе координат $X'O'Y'$ оптико-электронных приемников. Полусферическая система может быть спроецирована на плоскость с сохранением угловых характеристик (например, через полярное преобразование). Так, для нескольких изображений колец Ньютона в локальной системе прямоугольных координат $X'O'Y'$ синтезируются аппроксимирующие функции окружностей. Они позволяют рассчитать группу искоемых значений с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} (x - x_{от1})^2 + (y - y_{от1})^2 = r_{т1}^2 = R_{ин}\lambda; \\ (x - x_{от2})^2 + (y - y_{от2})^2 = r_{т2}^2 = 2R_{ин}\lambda; \\ \dots \\ (x - x_{отm})^2 + (y - y_{отm})^2 = r_{тm}^2 = nR_{ин}\lambda, \end{cases} \quad (21)$$

⁴ Достигнут ли предел мобильной фотографии: микропиксели на грани физических законов. URL: <https://www.ixbt.com/live/offtopic/dostignut-li-predel-mobilnoy-fotografii-mikropikseli-na-grani-fizicheskikh-zakonov.html> (дата обращения: 07.04.2026).

⁵ Жертва маркетинга: OmniVision сделала самую маленькую матрицу на 200 Мп для смартфонов. URL: <https://wylsa.com/zherstva-marketinga-omnivision-sdelala-samuyu-malenkuyu-matriczu-na-200-mp-dlya-smartfonov/> (дата обращения: 07.04.2026).

⁶ iMicro Q2 — портативный микроскоп для смартфона с увеличением до 800 раз. URL: <https://club.dns-shop.ru/digest/39884-imicro-q2-portativnyi-mikroskop-dlya-smartfona-s-uvelicheniem-do-800-raz/> (дата обращения: 07.04.2026).

где $x_{от1}, x_{от2} \dots x_{отn}$ и $y_{от1}, y_{от2} \dots y_{отn}$ — расчетные значения координат центров колец Ньютона по осям в локальной системе прямоугольных координат $X'O'Y'$.

Для полученного массива данных координат осуществляется усреднение, подобно вышеописанному, по формуле (18), и обратным преобразованием осуществляется переход к полусферической системе координат измерительного наконечника с соответствующим расчетом точки касания.

Вышеописанные алгоритмы расчетов двух групп параметров позволяют получить результаты измерений для бесконтактного ощупывания (рис. 8а) и контактных измерений (рис. 8б). На рис. 8в показано изображение двух групп колец Ньютона при переходе от бесконтактного ощупывания к контактными измерениям с определением координат центров колец Ньютона по осям в локальной системе прямоугольных координат $X'O'Y'$.

Анализ ИГ с подвижным штоком

Визуализация колец Ньютона расширяет функциональные возможности ИГ, позволяя осуществлять бесконтактное ощупывание детали в режиме «грубого отсчета», определять вектор приближения измерительного наконечника к детали и определять размеры зоны контакта.

В соответствии с системой уравнений (17) расчетные значения зазоров I_z пропорциональны значениям радиусов колец Ньютона во второй степени r_m^2 . При дифференцировании уравнения из этой системы изменения ΔI_z пропорциональны удвоенному значению изменений: $\Delta r_t: 2\Delta r_t$. Так, погрешность определения ΔI_z зависит от $2\Delta r_t$. С учетом этого минимальная погрешность определения зазоров при минимальном размере пикселя будет на уровне 0,8 мкм. Погрешность определения пространственного положения точки касания, зависящего от определения координат центров колец Ньютона, будет на уровне 0,4 мкм.

Суммарный порог чувствительности ИГ на основе трехкоординатного ВИД смещений зависит от порогов чувствительности по трем осям, а выражение для его расчета при условии равенства двух составляющих $\Delta I_{из2\ x} = \Delta I_{из2\ y} = \Delta I_{из2\ z}$, независимыми друг от друга и распределенных по нормальному закону во многом подобно уравнению (13). С учетом этого при использовании ВИД суммарный порог чувствительности таких ИГ будет 0,69 пм.

При необходимости увеличения радиусов колец можно достичь, используя способ формирования муаровых колец, заключающийся в использовании двухдлинноволнового источника света. Использование в интерферометре излучения с двумя разными длинами волн λ_1 и λ_2 позволяет получить две различные интерференционные картины. В результате переналожения этих картин образуется изображение муаровых (комбинационных) полос с синтезированной длиной волны $\lambda_{муар}$, эквивалентных системе интерференционных полос, которые возникают, если интерферометр работал бы на длине волны этих муаровых полос.

$$\lambda_{муар} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (22)$$

Применение этого метода для колец Ньютона позволяет записать уравнение применительно для радиусов при использовании лазерного двухдлинноволнового источника света:

$$r_{муар} = \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2}, \quad (23)$$

где r_1 и r_2 — радиусы колец Ньютона, формирующихся для двух длин волн.

Тогда выражение для соотношений радиусов темных колец в отраженном свете можно записать в следующем виде:

$$\frac{r_{mn1}}{r_{mn2}} = k_m = \frac{\sqrt{nR_{ин}\lambda_1}}{\sqrt{nR_{ин}\lambda_2}} = \sqrt{\frac{\lambda_1}{\lambda_2}}. \quad (24)$$

На рис. 7 показаны примеры изображений колец Ньютона при монохроматическом красном освещении (рис. 7а) и муарового кольца, полученного при двухдлинноволновом красном освещении (рис. 7б). С учетом этого расчетные значения радиусов пятого $r_{т5}$ ($n = 5$), седьмого $r_{т7}$ и девятого $r_{т9}$ ($n = 2$) темных колец Ньютона при их реализации муаровыми кольцами составят $r_{т5} \approx 68,76$ мкм, $r_{т7} \approx 81,36$ мкм и $r_{т9} \approx 92,25$ мкм соответственно. Увеличение радиусов колец Ньютона можно считать более удобным для регистрации их опико-электронными приемниками.

Заключение

1. В статье рассмотрены физико-технические основы двух типов ИГ с жестким и подвижным измерительными штоками.

2. Обсуждены особенности двух вариантов первого типа ИГ с жестким креплением измерительного наконечника к измерительному штоку, реализованные на основе изгиба последнего, а именно датчиков с ВБР и ВИД. Показано, что ИГ с использованием ВИД имеет более низкий порог чувствительности.

3. Рассмотрены три варианта ИГ с подвижным измерительным штоком. Показано, что при использовании трехкоординатных ВИД порог чувствительности по трем осям будет иметь субпикометрические значения. Представлен вариант встраивания миниатюрной широкоугольной видеокамеры Fisheye («Рыбий глаз») и реализации возможности визуализации образующихся так называемых колец Ньютона, которые позволяют осуществлять бесконтактное «ощупывание» детали.

Список источников / References

1. Зубарев Ю. М., Косаревский С. В., Тырс В. Р. Измерение параметров резьбы с использованием координатно-измерительных машин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 7 (110). С. 22–25. EDN: QCPRGN.
2. Zubarev Yu. M., Kosarevskiy S. V., Tyrs V. R. Izmereniye parametrov rez'by s ispol'zovaniyem koordinatno-izmeritel'nykh mashin. *Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2013;7(110):22–25. EDN: QCPRGN. (In Russ.).
3. Ушаков М. В., Воробьев И. А., Никольский С. М. Оценка области использования КИМ // Мир измерений. 2022. № 2. С. 49–51. EDN: GHQJHA.
4. Ushakov M. V., Vorobev I. A., Nikolsky S. M. CMMS' application area assessment. *Measurements World*. 2022;2:49–51. EDN: GHQJHA. (In Russ.).
5. Захаревич Е. М., Лапшин В. В., Шавва М. А. [и др.]. Измерительная система для контроля асферических линз из германия на ультрапрецизионных станках серии УТМ-250 //

- Фотоника. 2025. Т. 19, № 2 С. 116–129. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2025.19.2.116.129>. EDN: MZZXKX.
- Zakharevich E. M., Lapshin V. V., Shavva M. A. [et al.]. Measuring system for inspection of the germanium a spherical lenses using the UTM-250 ultraprecision machines. *Photonics Russia*. 2025;19(2):116–129. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2025.19.2.116.129>. EDN: MZZXKX. (In Russ.).
4. Бурдак С. В., Захаревич Е. М., Лапшин В. В. [и др.]. Инновационные разработки в области российского ультрапрецизионного станкостроения // Фотоника. 2024. Т. 18, № 2. С. 116–121. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.116.120>. EDN: LTOTRO.
- Burdak S. V., Zakharevich E. M., Lapshin V. V. [et al.]. Innovative developments in the field of Russian ultra-precision machine tools. *Photonics Russia*. 2024;18(2):116–121. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.116.120>. EDN: LTOTRO. (In Russ.).
5. Гапшиш В.-А. А., Каспарайтис А. Ю., Модестов М. Б. [и др.]. Координатные измерительные машины и их применение. Москва: Машиностроение, 1988. 328 с. ISBN 5-217-00003-1.
- Gapshis V.-A. A., Kasparaytis A. Yu., Modestov M. B. [et al.]. Koordinatnyye izmeritel'nyye mashiny i ikh primeneniye. Moscow, 1988. 328 p. ISBN 5-217-00003-1. (In Russ.).
6. Емельянов П. Н., Педь С. Е. Разработка эталонной координатно-измерительной машины с ЧПУ // Вестник МГТУ «Станкин». 2018. № 2 (45). С. 52–56. EDN: RQGJIF.
- Yemelyanov P. N., Ped S. E. Engineering of high precision coordinate measuring machine with CNC. *Vestnik MSTU "Stankin"*. 2018;2(45):52–56. EDN: RQGJIF. (In Russ.).
7. Леун Е. В. Гибридная 3D измерительная головка для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий сложной формы // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 140–146. EDN: ZUQNKP.
- Leun E. V. Hybrid 3D measuring head for high-precision contact and non-contact coordinate measuring for complex shape details. *Omsk Scientific Bulletin*. 2017;5(155):140–146. EDN: ZUQNKP. (In Russ.).
8. Куликов А. В. Волоконно-оптические акустические сенсоры на брегговских решетках: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 144 с.
- Kulikov A. V. Volokonno-opticheskiye akusticheskiye sensory na breggovskikh reshetkakh. Saint Petersburg, 2012. 144 p. (In Russ.).
9. Ефимов М. Е. Метод и аппаратура для регистрации акустической эмиссии и деформаций композитного графит-эпоксидного материала на основе анализа амплитудно-фазовых характеристик сигнала волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 140 с.
- Efimov M. E. Metod i apparatura dlya registratsii akusticheskoy emissii i deformatsiy kompozitnogo grafit-epoksidnogo materiala na osnove analiza amplitudno-fazovykh kharakteristik signala volokonno-opticheskogo interferometra Fabri-Pero. Saint Petersburg, 2018. 140 p. (In Russ.).
10. Самарин А. Лазерный микропроектор со спиральной разверткой // Компоненты и технологии. 2008. № 10 (87). С. 101–104. EDN: MTKAXF.
- Samarin A. Lazernyy mikroproyektor so spiral'noy razvertkoy. *Komponenty i Tekhnologii*. 2008;10(87):101–104. EDN: MTKAXF. (In Russ.).
11. Akhoundi F., Qin Y., Peyghambarian N. [et al.]. Compact fiber-based multi-photon endoscope working at 1700 nm. *Biomedical Optics Express*. 2018;9(5):2326–2335. <https://doi.org/10.1364/BOE.9.002326>.
12. Schowengerdt B., Johnston R., Melville C. [et al.]. 3D Displays using Scanning Laser Projection. *SID Symposium Digest of Technical Papers*. 2012;43:640–643. <https://doi.org/10.1002/j.2168-0159.2012.tb05863.x>.
13. Wu Y., Leng Y., Xi J. [et al.]. Scanning all-fiber-optic endomicroscopy system for 3D nonlinear optical imaging of biological tissues. *Optics Express*. 2009;17(10):7907–7915. <https://doi.org/10.1364/OE.17.007907>.
14. Zhao Y., Nakamura H., Gordon R. J. Development of a versatile two-photon endoscope for biological imaging. *Biomedical Optics Express*. 2010;1(4):1159–1172. <https://doi.org/10.1364/BOE.1.001159>.
15. Pisani M. A homodyne Michelson interferometer with sub-picometer resolution. *Measurement Science and Technology*. 2009;20(8):084008. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/8/084008>.
16. Libbrecht K. G., Black E. D. A basic Michelson laser interferometer for the undergraduate teaching laboratory demonstrating picometer sensitivity. *American Journal of Physics*. 2015;83(5):409–417. <https://doi.org/10.1119/1.4901972>.
17. Isleif K.-S., Heinzl G., Mehmet M., Gerberding O. Compact Multifringe Interferometry with Subpicometer Precision. *Physical Review Applied*. 2019;12(3):034025. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.12.034025>.
18. Леун Е. В. К вопросу достижения субпикометрической разрешающей способности акустооптическим двухканальным лазерным интерферометром перемещений с двумя разночастотными фотоприемниками // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 110–118. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-182-110-118>. EDN: LLRTUP.
- Leun E. V. On the issue of achieving subpicometric resolution by acousto-optic two-channel laser displacement interferometer with two different frequency photodetectors. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022;2(182):110–118. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-182-110-118>. EDN: LLRTUP. (In Russ.).
19. Семенов С. А. Прочность и долговечность волоконных световодов на основе кварцевого стекла: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2007. 233 с.
- Semenov S. L. Prochnost' i dolgovechnost' volokonnykh svetovodov na osnove kvartsevogo stekla. Moscow, 2007. 233 p. (In Russ.).
20. Фокина М. И. Формирования микрооптических поверхностей на основе фотоотверждения мономерных композиций в ближнем поле световой волны: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2012. 128 с.
- Fokina M. I. Formirovaniya mikroopticheskikh poverkhnostey na osnove fotootverzhdeniya monomernykh kompozitsiy v blizhnem pole svetovoy volny. Saint Petersburg, 2012. 128 p. (In Russ.).
21. Плеханов А. И., Шелковников В. В. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1-2. С. 240–244. EDN: HUAZGV.
- Plekhanov A. I., Shelkovnikov V. V. Opticheskiye volokna s kontsevyimi fotopolimernymi mikrolinzami. *Rossiyskiye Nanotekhnologii*. 2006;1(1-2):240–244. EDN: HUAZGV. (In Russ.).

Информация об авторе:

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

e-mail: stankin1999@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 10.04.2026; одобрена после рецензирования 13.05.2026; принята к публикации 11.06.2026.

Information about the author:

LEUN Evgeniy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer, Lavochkin Association, Khimki.

SPIN-code: 6060-8056

AuthorID (RSCI): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

e-mail: stankin1999@mail.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The article was submitted 10.04.2026; approved after reviewing 13.05.2026; accepted for publication 11.06.2026.

КОМБИНИРОВАННЫЕ ДАТЧИКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Д. Н. Клыпин 

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

 lan@omgtu.ru

В статье представлена разработка конструкции чувствительных элементов многоразовых датчиков для одновременной регистрации параметров жизненно важных систем организма человека и экспериментальная проверка технических характеристик макетных образцов.

При разработке конструкции датчиков использовались методы проектирования и изготовления многослойных печатных плат, 3D-моделирование конструкции датчиков и их сопряжения с существующими решениями. При моделировании зависимости характеристик датчиков от изменений температуры и концентрации измеряемых веществ использовались вычислительные методы. Более того, была проведена экспериментальная апробация опытной партии датчиков.

В исследовании предложены технические решения по конструкции датчиков одновременной регистрации нескольких параметров организма человека для использования при длительном мониторинге состояния жизненно важных систем организма человека — многоразовые комбинированные электроды «ЭКГ-температура» и «ЭКГ-метаболизм». Для изготовления датчиков используются технологические возможности производства стандартных печатных плат, за счет чего достигается высокая технологичность изготовления и низкая стоимость датчиков.

Датчики могут применяться как для кратковременного контроля состояния пациента при проведении функциональных и фармакологических проб, так и для длительной регистрации параметров в составе носимых многоканальных систем мониторинга организма человека.

Ключевые слова: электрод, мониторинг, электрокардиограмма, температура, метаболизм, глюкоза, лактаты

Для цитирования: Клыпин Д. Н. Комбинированные датчики биологических сигналов. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 122–129. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-122-129>. EDN: RVMSUO.



© Клыпин Д. Н., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

COMBINED BIOSENSORS

D. N. Klypin 

Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

 lan@omgtu.ru

The article presents the development of the design of sensitive elements of reusable sensors for simultaneous registration of parameters of vital systems of the human body and experimental verification of the technical features of prototype samples.

The author uses methods of designing and manufacturing multilayer printed circuit boards, 3D modeling of the sensors design and their interface with existing solutions. Computational methods are also applied to the dependence model of sensor features on changes in temperature and concentration of the measured substances. Moreover, an experimental approbation of an experimental batch of sensors is carried out.

The research suggests technical solutions for the design of sensors for simultaneous registration of several parameters of the human body in long-term monitoring of vital systems of the human body such as reusable combined electrodes "ECG temperature" and "ECG metabolism". Technological capabilities of the production of standard printed circuit boards are used for the manufacture of sensors, due to which the high manufacturability and low cost of sensors are achieved.

Sensors can be used both for short-term monitoring of a patients' condition during functional and pharmacological tests and for long-term recording of parameters as part of wearable multi-channel human body monitoring systems.

Keywords: biosensor, monitoring, electrocardiogram, temperature, metabolism, glucose, lactate

For citation: Klypin D. N. Combined biosensors. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):122–129. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-122-129>. EDN: RVMSUO. (In Russ.).



© Klypin D. N., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Для определения состояния жизненно важных систем организма человека (сердечно-сосудистой, дыхательной, двигательной и т. д.) проводится диагностика параметров этих систем, в частности регистрация электрокардиограммы (ЭКГ), измерение температуры тела, химические анализы биологических жидкостей (кровь, урина). Наиболее полную картину о состоянии организма человека дают системы мониторинга — длительной регистрации параметров в режиме реального времени [1, 2].

Чем большее число параметров может быть получено в ходе исследований, тем с большей достоверностью будет проведена диагностика. Количество регистрируемых параметров ограничено как техническими возможностями аппаратуры регистрации (количество каналов измерений, длительность регистрации, объем памяти для хранения данных и т. д.), так и эргономическими характеристиками аппаратуры — насколько удобно и физически возможно размещение большого количества датчиков на теле человека с учетом того, что от каждого датчика идет отдельный провод, мешающий движению человека.

Кроме того, для выявления редких проявлений отдельных патологий (например, аритмий сердца при холтер-мониторинге) необходима длительность регистрации не менее нескольких суток, что может доставлять большие неудобства пациенту при обычной жизнедеятельности. Наконец, крайне важное значение для диагностики имеет одновременность регистрации параметров. Следовательно, актуальной является разработка комбинированных датчиков для одновременной регистрации нескольких параметров состояния организма человека, позволяющих уменьшить число подключаемых к датчикам проводов и обеспечить длительный мониторинг.

Цель исследования — разработка конструкции чувствительных элементов многоразовых датчиков для одновременной регистрации параметров жизненно важных систем организма человека и экспериментальная проверка технических характеристик макетных образцов.

Основная часть

Рассмотрим методы одновременной регистрации ЭКГ и температуры тела человека.

Регистрация ЭКГ производится путем измерения электрокардиосигнала с тела человека в определенных точках (ЭКГ отведениях). Для регистрации

ЭКГ применяются специальные электроды, которые могут быть одноразовыми или многоразовыми. Для регистрации трех ЭКГ отведений нужно от 5 до 7 ЭКГ электродов, а для стандартной регистрации 12 отведений — 10. В системах мониторинга ЭКГ в течение суток (холтер-мониторинг) чаще всего используются одноразовые ЭКГ электроды, поскольку они удобны в установке и имеют минимальную стоимость. Однако одноразовые электроды не способны удерживаться на теле человека долгое время, а часто необходим многосуточный мониторинг ЭКГ.

Основу конструкции всех серийно выпускаемых одноразовых ЭКГ электродов составляет техническое решение¹. В центре типового ЭКГ электрода располагается контактная площадка диаметром 5...10 мм, выполненная из металла с нанесением слоя Ag/AgCl. Слой серебра уменьшает аллергические реакции и амплитуду потенциала поляризации электрода при электрическом контакте с кожей человека. Достоинством такого электрода является простота подключения одним электрическим контактом, а также высокая технологичность изготовления. Недостатком известного электрода является использование только для регистрации одного параметра — ЭКГ.

Температура тела человека измеряется термометрами с датчиками различного вида (максимальный, полупроводниковый, инфракрасный).

Долговременная регистрация температуры производится специальным датчиком, который подключается к блоку регистрации отдельным кабелем (рис. 1). Датчик температуры должен быть установлен на тело человека в определенном месте и обеспечивать надежное прилегание для корректных измерений.

Известен датчик температуры², принцип измерения температуры в котором реализован на компенсации теплового потока тела человека нагревательным элементом, расположенным в многослойной структуре из слоев ткани, при этом тепловой поток измеряется двумя терморезисторами. Достоинством известного датчика является его миниатюрность и гибкость, недостатками — сложность его изготовления, необходимость подведения дополнительных электродов для электропитания нагревателя и подключения терморезисторов, потребление электрической энергии датчиком, а также использование только для измерения одного параметра — температуры.

¹ Sessions R. W. Disposable electrode. US patent 3805769 A; filed May 24th, 1973; published April 23th, 1974.

² Пат. 2525568 С2 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/01, G 01 K 13/00, G 01 K 7/16. Датчик температуры для измерения температуры тела / Клевер Я., Чеунг Э. О. М., Ван Питерсон Л., Баккерс Э. П. А. М. № 2011144874/28; заявл. 01.04.2010; опубл. 20.08.2014. EDN: KTIYCF.



Рис. 1. Датчик температуры для систем мониторинга

Fig. 1. Temperature sensor for monitoring systems

Источник / Source: URL: <https://myairlife.com/product/lullaby>

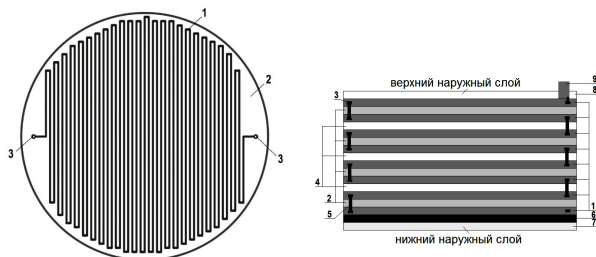


Рис. 2. Резистивная решетка одного слоя и послойная структура электрода ЭКГ-Т:

- 1 — резистивная решетка; 2 — гибкое диэлектрическое основание; 3 — контактные площадки;
4 — адгезив; 5 — металлизация; 6 — слой Ag;
7 — слой AgCl; 8 — покрывная плёнка;
9 — терминальные контакты

Fig. 2. Resistive grid of one layer and layered structure of an ECG-T electrode:

- 1 — resistive grid; 2 — flexible dielectric base;
3 — contact pads; 4 — adhesive; 5 — metallization;
6 — Ag layer; 7 — AgCl layer; 8 — coating film;
9 — terminal contacts

Источник / Source: разработано автором /
compiled by the author

Для носимых систем длительного мониторинга температуры важное значение имеет размер и масса датчиков [3].

Была поставлена задача по созданию технологичного и дешевого комбинированного датчика в виде электрода, совмещающего функции регистрации ЭКГ и температуры тела человека.

Прототипом для технического решения был выбран датчик температуры, имеющий многослойную керамическую структуру, при этом на каждом керамическом слое сформирована проводящая структура из меди или никеля, причем проводящие структуры всех слоев соединены электрически последовательно³. В предложенном техническом решении реализован известный принцип измерения температуры путем измерения сопротивления металла (меди, никеля или платины), меняющегося при изменении температуры. Датчик содержит тонкопленочный медный терморезистор с защитным слоем, снабженный контактами из меди в виде пленочных площадок и расположенный на поверхности изолирующей подложки. Достоинством такого

датчика является его миниатюрность и отсутствие потребления электрической энергии. Недостатками такого датчика являются технологическая сложность его изготовления, хрупкость и негибкость материала изолирующей подложки, а также измерение только температуры.

Таким образом, необходимо к датчику температуры добавить функции регистрации ЭКГ, а также увеличить его технологичность и гибкость.

Нами был разработан комбинированный электрод ЭКГ-температура⁴ (далее — ЭКГ-Т), имеющий многослойную структуру, сформированную из множества слоев с диэлектрическим основанием с нанесенной резистивной решеткой; межслойные проводящие соединения для последовательной связи всех резистивных решеток; терминальные контакты, сформированные по концам последовательно соединенных резистивных решеток. Диэлектрические основания всех слоев выполнены из гибкого материала — полиимида, на резистивную решетку нижнего наружного слоя нанесен слой Ag/AgCl, а на резистивную решетку верхнего наружного слоя нанесен слой защитной покрывной пленки.

На рис. 2 слева приведен пример формы резистивной решетки 1, нанесенной на одну из сторон одного слоя комбинированного электрода ЭКГ-Т, при этом диэлектрическое основание слоя 2 имеет вид круга. Резистивная решетка 1 с двух сторон оканчивается контактными площадками 3 для электрического соединения с резистивными решетками других слоев.

На рис. 2 справа приведен пример многослойной структуры комбинированного электрода ЭКГ-Т, состоящей из четырех слоев, каждый из которых состоит из гибкого диэлектрического основания 2, а с каждой стороны нанесена резистивная решетка 1. Все слои склеиваются между собой в единую конструкцию адгезивом 4, который является одновременно изолятором между слоями. Все резистивные решетки всех слоев электрически соединены в последовательную цепь посредством контактных площадок 3 и межслойных соединений с металлизацией 5.

Наружная резистивная решетка нижнего слоя электрода прикасается к коже пациента и покрыта слоями серебра Ag 6 и хлорида серебра AgCl 7 для уменьшения эффекта поляризации электрода при наложении на тело человека и исключения возможных аллергических реакций. Кроме того, решетка верхнего слоя электрода защищена от внешних воздействий покрывной пленкой 8. Терминальные контакты 9 подключаются так, чтобы все решетки были соединены последовательно. Второй терминальный контакт подключается через межслойное соединение с металлизацией (на рис. 2 не показано), проходящее через все слои снизу вверх и не имеющее электрического контакта ни с одной из резистивных решеток.

Как было упомянуто ранее, для изготовления датчика температуры могут применяться металлы, обладающие высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления металлов α , и хорошей линейностью α в измеряемом диапазоне температур. Серийно выпускаются датчики-тер-

³ Kasanami T., Tani H., Fujiwara S. Temperature sensor. US 5199791 A; filed June 11th, 1991; published April 06th, 1993.

⁴ Пат. 220876 U1 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/01, А 61 В 5/28, G 01 К 7/22. Комбинированный электрод ЭКГ-температура / Клыпин Д. Н. № 2023118118; заявл. 10.07.2023; опубл. 09.10.2023. EDN: CZSRBE.

морезисторы из меди ($\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), никеля ($\alpha = 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) и платины ($\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$). Лучшую линейность имеют платиновые терморезисторы, но они же имеют и наибольшую стоимость. Самую низкую стоимость имеют медные терморезисторы.

Для получения высокой технологичности изготовления и низкой цены датчика необходимо, чтобы он производился хорошо известными способами с возможностью выпуска миллионами штук. Одним из таких способов может быть способ серийного изготовления многослойных печатных плат для радиоэлектроники. Печатная плата представляет собой «пирог» из нескольких слоев диэлектрика с проводящей поверхностью (фольгой). Методами фотолитографии на слое диэлектрика может быть получен проводник любой конфигурации с шириной дорожек и зазорами между дорожками вплоть до 75 мкм. Проводящие поверхности выполняются из меди толщиной от 18 мкм. На внешние слои медных проводников может быть нанесено финишное покрытие разной толщины из припоя, никеля, серебра или золота.

Для получения датчика температуры со стандартизованным номинальным сопротивлением 50 или 100 Ом⁵ необходимо последовательно соединить определенное количество резистивных решеток, выполненных из меди.

Для расчета датчика температуры с номинальным сопротивлением 50 Ом из медных резистивных решеток формы, указанной на рис. 2 слева, была использована программа PCB Toolkit⁶, учитывающая особенности технологии изготовления печатных плат. Для расчета были заданы следующие параметры проводника — медная фольга стандартной толщиной 18 мкм без покрытия, ширина токопроводящей дорожки 0,1 мм. Необходимая длина проводника после расчета составила 3,78 м. Далее был рассчитан минимальный диаметр круглого электрода при заданных ограничениях — количество резистивных решеток не более 8, зазоры между токопроводящими дорожками 0,1 мм. В результате, для получения сопротивления 50 Ом при температуре 25 °С диаметр электрода должен быть не менее 12 мм.

Электрод изготавливается из следующих материалов:

- слой, состоящий из гибкого диэлектрика (бесклеевой двусторонне фольгированный полиимид 25 мкм толщиной 61 мкм), при этом резистивные решетки вытравлены с обеих сторон;

- адгезив (клей) — пленочный адгезивный акриловый материал толщиной 25 мкм;

- финишное покрытие на ближнем к телу человека внешнем слое — иммерсионное серебро толщиной 0,1...0,4 мкм, полученное стандартным способом при серийном изготовлении печатных плат (например, погружением платы в раствор с ионами серебра);

- покровная пленка на дистальном внешнем слое — 75 мкм (25 мкм полиимид + 50 мкм эпоксидный адгезив);

- хлорид серебра может быть получен на иммерсионном серебре любым способом, в самом простом варианте — электролизом в ванне с раствором NaCl, что практически не увеличивает толщину слоя серебра.

Общая толщина электрода номинальным сопротивлением 50 Ом, образованным последовательно соединенными восемью резистивными решетками (четыре слоя диэлектрика, три слоя адгезива, без терминальных электродов и слоя AgCl), составит $61 \cdot 4 + 25 \cdot 3 + 0,4 + 75 = 394,4$ мкм.

Подобная многослойная гибкая печатная плата может быть изготовлена многими производителями печатных плат⁷, что дает возможность снизить стоимость производства за счет конкуренции.

Полученный электрод толщиной 0,4 мм можно изгибать по любой из осей координат, а также методом прессования придать ему выпуклую форму, обеспечивающую надежный контакт с телом человека. Материалы (полиимид, серебро), используемые при производстве электрода ЭКГ-Т, биологически совместимы с кожей человека. Стандартизация сопротивления терморезистора электрода позволяет использовать типовые средства измерения.

Важное значение для диагностирования состояния организма человека имеет измерение концентрации таких метаболитов, как глюкоза и лактаты [4, 5] в биологических жидкостях человека. В стационарных условиях определение концентрации обычно производится в крови или моче, но для длительного мониторинга может использоваться только слюна или пот [6, 7] как обеспечивающие неинвазивный метод сбора биоматериала. Для носимых систем длительного мониторинга метаболитов большое значение имеет размер и масса электродов [8–13].

Для уменьшения габаритов систем мониторинга и удобства измерений разработаны планарные электроды, реализующие миниатюрные электрохимические ячейки, модифицированные известными химическими реагентами для измерения концентрации определенного химического вещества. Подобные электроды имеют низкую стоимость, поскольку для их изготовления используется метод трафаретной печати проводником (графит, серебро, медь) по изолирующему основанию (Screen-Printed Electrodes — SPE) [14, 15].

Типовой способ изготовления планарных электродов приведен в Патенте 2442130 С2⁸. Электрохимическая ячейка в этом решении образована двумя напечатанными серебряной пастой электродами — рабочим электродом и электродом сравнения. Рабочий электрод далее модифицируется берлинской лазурью и для определения концентрации глюкозы дополнительно иммобилизован энзимом глюкозооксидазы.

⁵ ГОСТ 6651–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. Введ. 2011–01–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 26 с.

⁶ Saturn PCB Design Toolkit Version 8.45. URL: <https://saturnpcb.com/saturn-pcb-toolkit/> (accessed: 04.08.2025).

⁷ Стандартные гибкие печатные платы. URL: <https://www.rezonit.ru/pcb/gibkie/serial/> (дата обращения: 04.08.2025).

⁸ Пат. 2442130 С2. Российская Федерация, МПК G 01 N 3/00, G 01 N 33/543. Способ изготовления модифицированных электродов, электроды, полученные указанным способом, и энзимные биосенсоры, включающие указанные электроды / Паллещи Д., Риччи Ф., Москоне Д., Поша А. № 2007146458/28; заявл. 12.12.2007; опубл. 10.02.2012. EDN: OVOKOC.



Рис. 3. Электрод, выполненный методом трафаретной печати с двойной электрохимической ячейкой

Fig. 3. An electrode made by screen printing with a double electrochemical cell

Источник / Source: URL: <https://metrohm-dropsens.com/products/electrodes/screen-printed-electrodes/dual-screen-printed-carbon-electrode-x1110/>

Планарные печатные электроды имеют высокий уровень воспроизводимости и высокую технологичность изготовления, что позволяет использовать их как одноразовые датчики концентрации метаболитов.

Недостатком такого электрода является определение только одного типа метаболита. Кроме того, использование электрохимической ячейки, образованной только двумя электродами, приводит к потере точности измерений при протекании тока более 1 мкА.

На основе технического решения разработаны и серийно выпускаются датчики различных веществ — SPE с трехэлектродной электрохимической ячейкой — рабочий/вспомогательный/электрод сравнения. Электрод сравнения чаще всего выполняется из серебра, покрытого хлоридом серебра — Ag/AgCl, или из серебра Ag, а рабочий и вспомогательный электроды выполняются из различных материалов с хорошей электропроводностью — от графита до золота. Для измерения концентрации определенного типа метаболита рабочий электрод иммобилизуется слоями берлинской лазури и фермент оксидазы нужного вещества.

Прототипом разработки является планарный электрод производства фирмы Metrohm X1110⁹, используемый для анализа сразу двух различных химических веществ (рис. 3). Для этого на изолирующем основании напечатано графитом два рабочих электрода. Такой электрод является полуфабрикатом для дальнейшей модификации. Так, поставляется вариант такого электрода, в котором оба рабочих электрода дополнительно покрыты берлинской лазурью. Дальнейшая возможная заказная модифи-

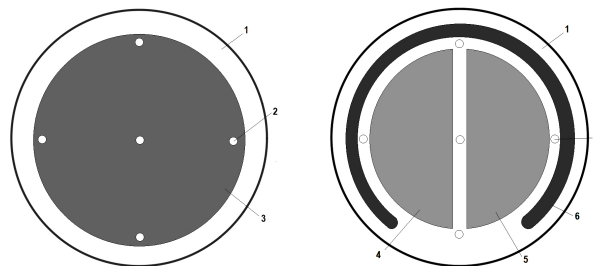


Рис. 4. Проксимальная (ЭКГ электрод) и дистальная (электрохимическая ячейка) от тела пациента стороны электрода ЭКГ-М: 1 — гибкое диэлектрическое основание; 2 — отверстия; 3 — электрод сравнения; 4 — первый рабочий электрод; 5 — второй рабочий электрод; 6 — вспомогательный электрод

Fig. 4. Proximal (ECG electrode) and distal (electrochemical cell) sides of the ECG-M electrode from the patient's body: 1 — flexible dielectric base; 2 — holes; 3 — reference electrode; 4 — first working electrode; 5 — second working electrode; 6 — auxiliary electrode

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

кация — иммобилизация соответствующих ферментов на рабочие электроды. Таким образом, с помощью одного электрода можно производить регистрацию концентрации одновременно двух разных химических веществ. Общим недостатком SPE является то, что требуемый объем анализируемого раствора, обеспечивающего полное покрытие области электрохимической ячейки, может достигать значительной величины (до 10 мл). Такое ограничение не позволяет использовать SPE для анализа небольших объемов пота, выделяемого телом человека. Кроме того, серийные SPE выполнены на керамическом основании, что придает им хрупкость и жесткость.

Поставлена задача создания комбинированного датчика — электрода «ЭКГ-метаболиты» с увеличенной функциональностью и технологичностью изготовления.

Нами разработан комбинированный электрод «ЭКГ-метаболиты»¹⁰ (далее — ЭКГ-М), имеющий диэлектрическое основание, электрод сравнения, вспомогательный электрод, два рабочих электрода, оба покрытые слоем берлинской лазури, при этом диэлектрическое основание выполнено из гибкого материала — полиимида, все электроды выполнены из медной фольги, покрытой серебром Ag, электрод сравнения дополнительно покрыт слоем хлорида серебра AgCl, первый рабочий электрод дополнительно покрыт ферментом лактатоксидазы, второй рабочий электрод дополнительно покрыт ферментом глюкозооксидазы, при этом электрод сравнения расположен на стороне электрода, прилегающего к телу человека, и является одновременно электродом для регистрации ЭКГ, вспомогательный электрод и рабочие электроды расположены на противоположной стороне электрода и покрыты прокладкой из впитывающего пот материала, а диэлектрическое основание имеет ряд отверстий для проникновения пота.

⁹ Dual Screen-Printed Carbon Electrode. URL: <https://metrohm-dropsens.com/products/electrodes/screen-printed-electrodes/dual-screen-printed-carbon-electrode-x1110/> (accessed: 04.08.2025).

¹⁰ Пат. 220817 U1 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/28, А 61 В 5/1486, G 01 N 33/543. Комбинированный электрод ЭКГ-метаболиты / Клыпин Д. Н. № 2023118127; заявл. 10.07.2023; опубл. 04.10.2023. EDN: GFLODL.

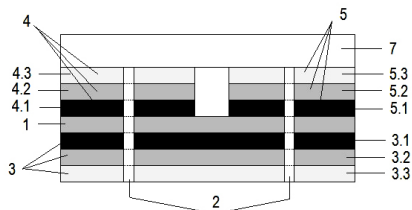


Рис. 5. Послойная структура электрода ЭКГ-М:

- 1 — гибкое диэлектрическое основание;
2 — отверстия; 3 — электрод сравнения, состоящий из слоев: 3.1 — Cu, 3.2 — Ag, 3.3 — AgCl; 4 — первый рабочий электрод, состоящий из слоев: 4.1 — Cu, 4.2 — берлинская лазурь, 4.3 — энзим лактатооксидазы; 5 — второй рабочий электрод, состоящий из слоев 5.1 — Cu, 5.2 — берлинская лазурь, 5.3 — энзим глюкозооксидазы; 7 — прокладка

Fig. 5. Layered structure of the ECG-M electrode:

- 1 — flexible dielectric base; 2 — holes;
3 — reference electrode consisting of layers: 3.1 — Cu, 3.2 — Ag, 3.3 — AgCl; 4 — first working electrode consisting of layers: 4.1 — Cu, 4.2 — Prussian blue, 4.3 — lactate oxidase enzyme; 5 — second working electrode consisting of the layers 5.1 — Cu, 5.2 — Prussian blue, 5.3 — glucose oxidase enzyme; 7 — gasket

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Вид разработанного электрода приведен на рис. 4 (слева показана проксимальная сторона, контактирующая с телом человека, справа — дистальная от тела человека сторона). Электрод выполнен в виде многослойной гибкой печатной платы. Последовательность слоев приведена на рис. 5 (вспомогательный электрод для упрощения не показан).

Разработанный электрод содержит:

— слой 1, состоящий из гибкого диэлектрика (бесклеевой двусторонне фольгированный полиимид 25 мкм толщиной 61 мкм) с отверстиями 2 для проникновения пота;

— слой проводника 3.1 с финишным покрытием из иммерсионного серебра 3.2 и хлорида серебра 3.3 образует электрод сравнения 3 (ЭКГ — электрод);

— слой проводника 4.1, покрытого слоем берлинской лазури 4.2 и энзимом лактатооксидазы 4.3, образует первый рабочий электрод 4;

— слой проводника 5.1, покрытого слоем берлинской лазури 5.2 и энзимом глюкозооксидазы 5.3, образует второй рабочий электрод 5;

— слой проводника с финишным покрытием из иммерсионного серебра образует вспомогательный электрод 6;

— прокладка 7 из впивающего пот материала (например, микрофибры толщиной 0,5...1 мм).

Первый рабочий электрод 4, электрод сравнения 3 и вспомогательный электрод 6 образуют первую часть двойной электрохимической ячейки, производящую измерение концентрации лактатов.

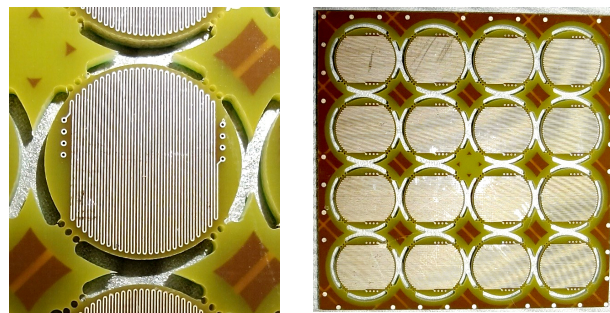


Рис. 6. Внешний вид экспериментальных образцов электродов ЭКГ-Т

Fig. 6. Appearance of experimental samples of ECG-T electrodes

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Второй рабочий электрод 5, электрод сравнения 3 и вспомогательный электрод 6 образуют вторую часть двойной электрохимической ячейки, производящую измерение концентрации глюкозы.

Регистрация ЭКГ производится электродом сравнения 3 (он же электрод ЭКГ).

Регистрация метаболитов производится двойной электрохимической ячейкой, которая начинает работать при накоплении в прокладке 7 достаточного объема пота, проникает через отверстия 2.

Общая толщина разработанного электрода ЭКГ-М без прокладки составляет не более 100 мкм. Полученный электрод можно изгибать по любой из осей координат, а также методом прессования придать ему выпуклую форму, обеспечивающую надежный контакт с телом человека.

Экспериментальные исследования

Для выяснения соответствия расчетам и заявленным техническим характеристикам были изготовлены и исследованы экспериментальные образцы электродов ЭКГ-Т.

Разработка топологии платы электрода проведена в программной среде Altium Designer¹¹. Опытная партия из 32 электродов произведена на предприятии «Резонит» (г. Москва).

Для удешевления и ускорения изготовления экспериментальных образцов было выбрано изготовление электродов из типовых жестких материалов, общая толщина электрода из восьми слоев с покрывными масками составила 1 мм.

На рис. 6 приведены фотографии изготовленных электродов ЭКГ-Т — одиночный слева, групповая заготовка из 16 электродов — справа.

Для оценки разброса сопротивления электродов в партии были проведены измерения всех 16 электродов в заготовке. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Для измерений сопротивления электродов был использован вольтметр универсальный АКИП-2101, режим измерения R — по четырехпроводной схеме, абсолютная погрешность измерений $\pm 0,025$ Ом.

Среднее значение сопротивления в группе составило $R_{cp} = 52,6075$ Ом.

Максимальное абсолютное отклонение составило $\Delta_{max} = 0,4475$ Ом (электрод № 13).

¹¹ Altium Designer: The Industry's Leading PCB Design Software. URL: <https://www.altium.com/altium-designer> (accessed: 04.08.2025).

Таблица 1. Сопротивление электрода при 26 °С, Ом
Table 1. Electrode resistance at 26 °C, Ом

№ 1 — 52,61	№ 2 — 52,95	№ 3 — 52,742	№ 4 — 52,93
№ 5 — 52,33	№ 6 — 52,96	№ 7 — 52,72	№ 8 — 52,61
№ 9 — 52,27	№ 10 — 52,71	№ 11 — 52,45	№ 12 — 52,61
№ 13 — 52,16	№ 14 — 52,70	№ 15 — 52,33	№ 16 — 52,59

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

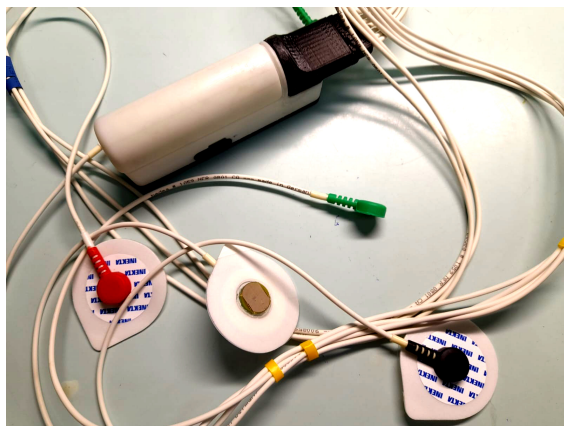


Рис. 7. Внешний вид электрода ЭКГ-Т, интегрированного в стандартный одноразовый электрод

Fig. 7. Appearance of an ECG-T electrode integrated into a standard disposable electrode

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Максимальное относительное отклонение составило $\Delta_{\max}/R_{\max} \cdot 100\% = 0,4475/52,96 \cdot 100 = 0,845\%$ ($R_{\max}$ у электрода № 6).

Разброс номинального значения сопротивления в группе составил не более 1 %.

Для оценки чувствительности электрода по температуре экспериментальный образец № 6 был испытан при разных температурах. Его сопротивление при 23 °С составило 52,713 Ом, а при 100 °С — 65,206 Ом.

Полученный температурный коэффициент зависимости сопротивления электрода от температуры составил

$$\alpha = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} = \frac{65,206 - 52,713}{100 - 23} = 0,003.$$

Тестирование еще нескольких образцов электрода дало тот же результат, что и электрод № 6.

При этом температурный коэффициент зависимости сопротивления чистой меди от температуры составил 0,0043. Таким образом, нами получен термодатчик с несколько меньшей, чем у медного термосопротивления, чувствительностью. Предположительно, это связано с крайне малой площадью поперечного сечения проводника электрода:

$$S = \text{толщина меди} \cdot \text{ширина проводника} = 18 \text{ мкм} \cdot 100 \text{ мкм} = 1800 \text{ мкм}^2 = 0,0018 \text{ мм}^2.$$

Для оценки возможности регистрации ЭКГ с помощью электродов ЭКГ-Т были модифицированы 2 стандартных одноразовых электрода. Модификация проводилась следующим образом: из середины электрода извлекался штатный проводящий элемент (собственно электрод), а на его место вклеивался электрод ЭКГ-Т, а один из выводов с обратной стороны электрода ЭКГ-Т подключался к кнопочному коннектору. На рис. 7 в центре показан модифицированный электрод.

С помощью кардиомонитора регистрировалось одно отведение двумя парами электродов — парой стандартных одноразовых и парой электродов ЭКГ-Т. По результатам измерений установлено, что морфология QRS-комплексов не нарушена, уровень шумов при регистрации электродами ЭКГ-Т незначительно превышал уровень шумов от стандартных электродов, что говорит о возможности регистрации ЭКГ электродами ЭКГ-Т с необходимым качеством.

Заключение

Разработаны уникальные датчики биологических сигналов состояния организма человека — многоразовые комбинированные электроды «ЭКГ-температура» и «ЭКГ-метаболиты».

Преимущества предложенных датчиков:

1. Одновременная регистрация биологических параметров разной природы за счет регистрации электрических сигналов (ЭКГ, электроэнцефалограмма, миограмма) вместе с регистрацией температуры или концентрации метаболитов (лактаты, глюкозы и т. п.).
2. Точное измерение биологических сигналов за счет качественного контакта с телом человека.
3. За счет использования диэлектриков, стабильных к внешним воздействиям и к температуре, а также за счет финишной защиты внешней поверхности, обеспечиваются стабильные технические характеристики.
4. За счет применения биологически нейтральных материалов, непосредственно касающихся кожи человека (полиимид и слой Ag/AgCl), обеспечивается биологическая совместимость с кожей человека.
5. Благодаря использованию промышленных технологий изготовления гибких печатных плат, достигается высокая технологичность и низкая себестоимость при больших объемах производства.

Разработанные датчики предназначены для использования в полифункциональных системах мониторинга состояния жизненно важных систем организма человека при обеспечении надежной фиксации на теле пациента известными способами, например, эластичным поясом¹².

¹² Электродный пояс Tapuz с встроенными электродами ЭКГ. URL: <https://atesmedica.ru/catalog/elektrodneyy-poyas-tapuz/> (дата обращения: 04.08.2025).

Партия электродов «ЭКГ-метаболизмы» находится в состоянии изготовления. Их экспериментальным исследованиям будет посвящено следующее исследование.

Список источников / References

1. Тычков А. Ю., Бутров Н. А., Алимуратов А. К., Назарычев А. П. Многоканальная система мониторинга основных показателей здоровья человека // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 3–14. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2021-2-1>.
2. Tychkov A. Yu., Butrov N. A., Alimuradov A. K., Nazarychev A. P. Multichannel system for monitoring the main indicators of human health. *University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences*. 2021;2:3–14. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2021-2-1>. (In Russ.).
3. Yuldashev Z. M. A Remote System for Monitoring the State of Health of People with Chronic Diseases and Predicting Periods of Exacerbation. *Biomedical Engineering*. 2023;5(56):294–297. <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10222-w>. EDN: AAYZRR.
4. Yang H. Wearable flexible temperature sensors and their applications. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2024;102:124–128.
5. Момыналиев К. Т., Прокопьев М. В., Иванов И. В. Обзор современных датчиков для непрерывного мониторингирования уровня глюкозы // Сахарный диабет. 2023. Т. 26, № 6. С. 575–584. <https://doi.org/10.14341/DM13043>. EDN: DFUNWV.
6. Momynaliev K. T., Prokopiev M. V., Ivanov I. V. Overview of modern sensors for continuous glucose monitoring. *Diabetes Mellitus*. 2023;26(6):575–584. <https://doi.org/10.14341/DM13043>. EDN: DFUNWV. (In Russ.).
7. Вохмянина Д. В., Карякина Е. Е., Андреев Е. А., Карякин А. А. Мультибиосенсор на основе берлинской лазури для одновременного определения глюкозы и лактата в тонкослойной проточно-инжекционной системе // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2018. Т. 59, № 5. С. 337–344. EDN: XPURNZ.
8. Vokhmyanina D. V., Karyakina E. E., Andreev E. A., Karyakin A. A. Thin-film prussian blue based multibiosensor for glucose and lactate simultaneous determination. *Vestnik MSU. Chemistry Series*. 2018;59(5):337–344. EDN: XPURNZ. (In Russ.).
9. Bakker J., Nijsten M. W., Jansen T. C. Clinical use of lactate monitoring in critically ill patients. *Annals of Intensive Care*. 2013;3(1):12. <https://doi.org/10.1186/2110-5820-3-12>.
10. Luo T. T., Sun Zh., Li C. [et al.]. Monitor for lactate in perspiration. *The Journal of Physiological Sciences*. 2021;71:26. <https://doi.org/10.1186/s12576-021-00811-3>.
11. Bandodkar A. J., Wang J. Non-invasive wearable electrochemical sensors: A review. *Trends in Biotechnology*. 2014;32(7):363–371. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.04.005>.
12. Legner C., Kalwa U., Patel V. [et al.]. Sweat sensing in the smart wearables era: Towards integrative, multifunctional and body-compliant perspiration analysis. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019;296:200–221. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.07.020>.
13. Bariya M., Nyein H. Y. Y., Javey A. Wearable sweat sensors. *Nature Electronics*. 2018;1(3):160–171. <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0043-y>.
14. Komkova M. A., Eliseev A. A., Poyarkov A. A. [et al.]. Simultaneous monitoring of sweat lactate content and sweat secretion rate by wearable remote biosensors. *Biosensors and Bioelectronics*. 2022;202:113970. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.113970>.
15. Yang G., Hong J., Park S-B. Wearable device for continuous sweat lactate monitoring in sports: A narrative review. *Frontiers in Physiology*. 2024;15:1376801. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1376801>.
16. Shitanda I., Ozone Yu., Morishita Yu. [et al.]. Air-bubble-insensitive microfluidic lactate biosensor for continuous monitoring of lactate in sweat. *ACS Sensors*. 2023;8(6):2368–2374. <https://doi.org/10.1021/acssensors.3c00490>.
17. Hart J. P., Crew A., Crouch E. [et al.]. Some recent designs and developments of screen-printed carbon electrochemical sensors/biosensors for biomedical, environmental, and Industrial analyses. *Analytical Letters*. 2004;37:789–830. <https://doi.org/10.1081/AL-120030682>.
18. Gryaznova M. I., Lugvishchuk D. S., Gryaznov K. O. [et al.]. Screen-printing of electrical sensor for glucose determination with exfoliated graphite-based paste. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2023;8(2):111–119. <https://doi.org/10.17277/jamt.2023.02.pp.111-119>.

Информация об авторе:

КЛЫПИН Дмитрий Николаевич, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории «Микропроцессорные устройства» Научно-исследовательского института радиоэлектроники и приборостроения Омского государственного технического университета, г. Омск.
SPIN-код: 9881-5316
AuthorID (РИНЦ): 681588
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8263-0206>
AuthorID (SCOPUS): 37111005000
ResearcherID: E-7467-2014
e-mail: lan@omgtu.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 25.11.2025; одобрена после рецензирования 23.01.2026; принята к публикации 04.06.2026.

Information about the author:

KLYPIN Dmitrii Nikolayevich, Senior Researcher, Research Laboratory "Microprocessor Devices", Research Institute of Radioelectronics and Instrument Engineering, Omsk State Technical University, Omsk.
SPIN-code: 9881-5316
AuthorID (RSCI): 681588
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8263-0206>
AuthorID (SCOPUS): 37111005000
ResearcherID: E-7467-2014
e-mail: lan@omgtu.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The article was submitted 25.11.2025; approved after reviewing 23.01.2026; accepted for publication 04.06.2026.

КОГНИТИВНО-ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС РАБОЧЕГО МЕСТА ДИСПЕТЧЕРА СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА АГРОПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

С. В. Мацеевич¹, А. В. Тимошенко¹✉, В. А. Козырев²,
Г. М. Зюзин³, А. В. Мацеевич¹

¹Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
Россия, 125167, г. Москва, пр. Ленинградский, 49/2

²ООО «ТехСервис», Россия, 150025, г. Ярославль, ул. Магистральная, 40А

³Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Россия, 150001, г. Ярославль, пр. Московский, 28

✉ u567ku78@gmail.com

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности управления сложной сельскохозяйственной техникой в агропромышленных предприятиях Российской Федерации. В условиях роста количества аварийных и нестандартных ситуаций ключевая роль отводится диспетчеру ситуационного центра, оперативность действий которого напрямую зависит от качества графического интерфейса системы визуализации. Целью работы является сокращение времени ликвидации аварийных ситуаций путём оптимизации времени анализа информации и принятия решения диспетчером на основе применения когнитивно-графического интерфейса.

В статье предложена оригинальная формализация общего времени ликвидации аварии, представленного в виде суммы четырёх независимых компонентов: времени обнаружения и идентификации аварии, времени анализа информации и принятия решения, времени на логистику и времени устранения аварии. Показано, что наиболее управляемым фактором является второй компонент, зависящий от метода поддержки принятия решения и качества графического интерфейса. Для его оптимизации разработан когнитивно-графический интерфейс на основе фрактала Новоселова, реализующий иерархическую самоподобную структуру визуализации. В едином интерактивном окне интегрированы 36 контролируемых параметров, сгруппированных в шесть смысловых блоков (сложность ситуации, опасность, метеоусловия, состав бригады, доступные средства, логистика).

Полученные результаты экспериментальной оценки показывают, что применение предложенного интерфейса позволяет сократить время анализа информации и принятия решения на 30–40 % по сравнению с классическими интерфейсами без потери точности. Разработанные принципы могут быть использованы при модернизации программного обеспечения ситуационных центров агропромышленных предприятий.

Ключевые слова: информационно-измерительные системы, управляющие системы, поддержка принятия решений, когнитивно-графический интерфейс, эргономические характеристики, ситуационный центр

Для цитирования: Мацеевич С. В., Тимошенко А. В., Козырев В. А., Зюзин Г. М., Мацеевич А. В. Когнитивно-графический интерфейс рабочего места диспетчера ситуационного центра агропромышленного предприятия. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 130–137. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-130-137>. EDN: ACXYIW.



© Мацеевич С. В., Тимошенко А. В., Козырев В. А.,
Зюзин Г. М., Мацеевич А. В., 2026.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

COGNITIVE GRAPHICAL INTERFACE OF THE DISPATCHER WORKPLACE OF THE SITUATIONAL CENTER IN THE AGRO-INDUSTRIAL ENTERPRISE

S. V. Matseevich¹, A. V. Timoshenko¹✉, V. A. Kozyrev²,
G. A. Zyuzin³, A. V. Matseevich¹

¹Financial University under the Government of the Russian Federation,
Leningradsky Ave., 49/2, Moscow, 125167, Russia

²LLC "Techservice", Magistralnaya St., 40A, Yaroslavl, 150025, Russia

³Yaroslavl Higher Military School of Air Defense,
Moskovsky Ave., 28, Yaroslavl, 150001, Russia

✉ u567ku78@gmail.com

The relevance of the research is determined by the need to improve the efficiency of managing complex agricultural equipment in agricultural enterprises of the Russian Federation. In the context of an increasing number of emergencies, a key role is assigned to the dispatcher of the situation center, whose efficiency of actions directly depends on the quality of the graphical interface of the visualization system. Therefore, the aim of the research is to reduce the time for eliminating emergency situations by optimizing the time of the information analysis and decision-making by the dispatcher based on a cognitive-graphical interface.

The article proposes an original formalisation of the total time to eliminate an accident, presented as the sum of four independent components: the time to detect and identify an accident, the time to analyse information and make a decision, the time for logistics and the time to eliminate an accident. It is shown that the most manageable factor is the second component, which depends on the method of decision support and the quality of the graphical interface. To optimize it, the authors provide a cognitive graphical interface based on the Novoselov fractal, which implements a hierarchical self-similar visualisation structure. Moreover, 36 controlled parameters are integrated in a single interactive window, grouped into six semantic blocks (complexity of the situation, danger, weather conditions, team composition, available funds, logistics).

The experimental results show that the proposed interface reduces the time for information analysis and decision-making by 30–40 % compared to classical interfaces without loss of accuracy. The developed principles can be used to modernize the software of situational centers of agro-industrial enterprises.

Keywords: information and measurement systems, control systems, decision support, cognitive-graphical interface, ergonomic features, situational center

For citation: Matseevich S. V., Timoshenko A. V., Kozyrev V. A., Zyuzin G. A., Matseevich A. V. Cognitive graphical interface of the dispatcher workplace of the situational center in the agro-industrial enterprise. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026. No. 2 (198). P. 130–137. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-130-137>. EDN: ACXYIW. (In Russ.).



© Matseevich S. V., Timoshenko A. V., Kozyrev V. A.,
Zyuzin G. A., Matseevich A. V., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В настоящее время перед агропромышленным комплексом Российской Федерации стоит важная задача оснащения его современной сельскохозяйственной техникой, а также обеспечения ее системами мониторинга состояния для обеспечения своевременного техобслуживания и ремонта¹. По состоянию на 30 декабря 2025 г. в сельскохозяйственных организациях Ярославской области находятся 4413 единиц

сельскохозяйственной техники. В то же время значительная часть сельскохозяйственных предприятий не в состоянии качественно и своевременно выполнять сервисное обслуживание (диагностику, техническое обслуживание, ремонт, снабжение запчастями, подготовку специалистов) сложной сельскохозяйственной техники (доильных установок и агрегаторов, зерноуборочных, кормоуборочных и картофелеуборочных комбайнов, тракторов и т. д.)^{2,3} [1, 2].

¹ Об утверждении Стратегии развития производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 04.07.2023 N 1788-р (ред. от 08.05.2025). Доступ из справочно-правовой системы «Консультант-Плюс».

² Ярославская область. 2025: краткий статистический сборник-ежегодник. URL: https://76.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/yaroslavskaya_oblast_v_tsifrah_2025_g..pdf (дата обращения: 02.03.2026).

³ Озорнин С. П. Повышение работоспособности мобильных машин в структурах агропромышленного комплекса на основе ситуационно-комбинированного обслуживания и ремонта: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2005. 39 с.

Нормативно-техническая документация по обслуживанию сложной сельскохозяйственной техники, существующая в настоящее время, разрабатывалась без учета современных средств автоматизации и технологий искусственного интеллекта и нуждается в модернизации. Активное развитие производства невозможно без использования современной техники [3], что требует соответствующей квалификации работников агрокомплексов, в частности обслуживающего (ремонтного) персонала, способного профессионально провести профилактический либо аварийный ремонт техники, что может быть достигнуто при качественном обучении и быстром реагировании диспетчера ситуационного центра.

На плечи диспетчера ситуационного центра возложена задача мониторинга состояния техники и оборудования агропромышленного предприятия с целью своевременного проведения штатного и аварийного технического обслуживания, решения по комплектованию ремонтных бригад, снабжения запасными частями машин.

Постановка задачи

Рассмотрим следующую постановку задачи. Пусть время ликвидации аварийной ситуации $\tau_{\text{л.а.}}$ можно представить в виде суммы нескольких независимых компонентов:

$$\tau_{\text{л.а.}} = \tau_{\text{о.}} + \tau_{\text{а.п.р.}} + \tau_{\text{л.}} + \tau_{\text{у.а.}} \quad (1)$$

где $\tau_{\text{о.}}$ — время обнаружения и идентификации аварийной ситуации; $\tau_{\text{а.п.р.}}$ — время анализа информации и принятия решения диспетчером по методам ликвидации данной аварийной ситуации; $\tau_{\text{л.}}$ — время на логистику, описывающее сбор выездной бригады и их движение к месту аварии; $\tau_{\text{у.а.}}$ — время устранения аварийной ситуации.

Время обнаружения и идентификации аварийной ситуации $\tau_{\text{о.}}$ в общем случае не зависит от действий диспетчера и выполняется в полуавтоматическом режиме системами контроля функционирования на местах аварий либо по результатам анализа информации, поступающей в ситуационный центр (СЦ) [4]. Оптимизировать данное время возможно за счёт совершенствования алгоритмов анализа данных либо за счёт реализации в рамках систем поддержки принятия решения (СППР) алгоритмов прогнозирования аварийных ситуаций [5]. Поэтому $\tau_{\text{о.}}$ можно представить в следующем виде:

$$\tau_{\text{о.}} = f_1(A, G, P), \quad (2)$$

где A — алгоритмы анализа информации; G — графический интерфейс, на котором отображается информация о текущей ситуации; P — алгоритмы прогнозирования аварийных ситуаций.

В свою очередь время анализа информации и принятия решения $\tau_{\text{а.п.р.}}$ характеризующее непосредственную деятельность диспетчера при поступлении к нему информации об аварийной ситуации, можно представить в следующем виде:

$$\tau_{\text{а.п.р.}} = f_2(D(M), G), \quad (3)$$

где D — процесс принятия решения диспетчером по результатам анализа информации; M — метод поддержки принятия решения; G — графический интерфейс.

Рассмотрим процесс поддержки принятия решения в следующем обобщенном виде. Пусть не-

которая аварийная ситуация описывается вектором параметров $S = (s_1, \dots, s_n)$, где s_i — параметр, характеризующий данную ситуацию (например, выход из строя оборудования, наличие или отсутствие аномалий в телеметрии, метеоусловия и т. д.). Пусть аварийная ситуация имеет некоторое решение, описываемое вектором параметров $R = (r_1, \dots, r_m)$, где r_i — параметр, характеризующий это решение (например, использование конкретных средств автоматизации, оборудования или автотранспорта). В общем случае аварийная ситуация может иметь несколько различных решений $\{R\}^S$. В таком случае возникает вопрос выбора лучшего решения или ранжирования всех решений по некоторому критерию.

Пусть $\{K\}^S$ — множество критериев, соответствующих решениям ситуации S , тогда процесс поддержки принятия решения можно представить в виде формирования множества возможных решений $\{R\}^S$ ситуации S , их ранжирования с учётом множества критериев $\{K\}^S$. В рамках СППР это может быть реализовано различными методами: методом анализа иерархий, методом аналитических сетей и т. д. [6]. Поскольку до 90 % информации о текущей ситуации диспетчер получает в результате взаимодействия с графическим интерфейсом, необходимо учитывать эффективность представления и отображения данной информации.

Наконец, логистическое время $\tau_{\text{л.}}$ и время устранения аварии $\tau_{\text{у.а.}}$ напрямую не зависят от действий диспетчера. Поэтому введём следующие обозначения. Пусть B — состав комплектования выездной ремонтной бригады; T — состав транспортных средств; L — маршрут следования бригады. Тогда

$$\tau_{\text{л.}} = f_3(L(D^0)); \quad (4)$$

$$\tau_{\text{у.а.}} = f_4(B(D^0), T(D^0)), \quad (5)$$

где D^0 — принятое диспетчером решение по ликвидации аварийной ситуации данным составом ремонтной бригады или автотранспортом и указанным маршрутом следования.

Исходя из (1) – (5), задача повышения оперативности ликвидации аварийной ситуации может быть представлена в виде задачи повышения оперативности действий диспетчера СЦ и представляет собой оптимизацию следующего вида:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{opt}} &= \min(\tau_{\text{л.а.}}) = \min(\tau_{\text{о.}} + \tau_{\text{а.п.р.}} + \tau_{\text{л.}} + \tau_{\text{у.а.}}) = \\ &= \min_{G, M}(F(A, P, G, D(M))). \end{aligned} \quad (6)$$

Метод поддержки принятия решения M зависит от архитектуры и состава СППР и может быть реализован с учётом существующих школ проектирования СППР [7]. Перепишем формулу (6) в следующем виде, сконцентрировавшись непосредственно на повышении оперативности работы диспетчера СЦ:

$$\tau_{\text{opt}} = \min(\tau_{\text{а.п.р.}}) = \min(\tau(G)|_{D_{\text{fix}}}). \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), важную роль в обеспечении оперативности действий диспетчера, а также в ликвидации аварийной ситуации играет качество графического интерфейса системы визуализации — совокупности рабочих окон, индикаторов, средств навигации и т. д. Современные графические интерфейсы обычно формируют на базе



Рис. 1. Алгоритм формирования КГИ диспетчера СЦ
 Fig. 1. Algorithm for forming the cognitive graphical interface of the dispatcher of the situational center
 Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

классических приложений Windows или Astra Linux, что не обеспечивает в должной мере высоких эргономических показателей.

Исследования показали, что для наиболее эффективного варианта обоснования состава и структуры графического интерфейса следует применить методы когнитивной графики [8], в частности когнитивно-графический интерфейс (КГИ) для отображения информации.

Формирование КГИ

Согласно [9, 10], под КГИ понимается интерфейс, созданный с учетом особенностей восприятия и мышления человека, который позволяет снизить когнитивную нагрузку на пользователя и повысить скорость и точность принятия решений по результатам оперативного анализа информации. Под когнитивной нагрузкой понимается степень, в которой диспетчер занят текущей задачей [11, 12].

Будем полагать, что основными задачами КГИ являются:

- визуализация больших объемов данных о состоянии системы;
- однозначная визуализация аномалий в сети или динамики развития аварийных ситуаций;
- управление вниманием диспетчера путем фильтрации нерелевантной и отображением наиболее полезной информации;
- возможность адаптации под особенности диспетчера (под уровень его опыта и знаний).

Обобщенный алгоритм формирования КГИ представлен на рис. 1. В первую очередь определяются особенности работы диспетчера СЦ: уровень его рабочих обязанностей, перечень информации, необходимой для принятия решения, а также информация о составе и структуре текущего графического интерфейса, с которым он работает. На основании данной информации выделяются три типа параметров:

1. Ключевые параметры, характеризующие текущую ситуацию и позволяющие однозначно или с заданной точностью идентифицировать её как аварийную — вектор параметров S .
2. Ключевые параметры, характеризующие принятое диспетчером решение с точки зрения сил и средств (маршрут, состав комплектования выездной бригады и т. д.) — вектор параметров R .
3. Множество критериев, характеризующих принятые решения $\{K\}$.

На основании сформированных параметров осуществляется классификация параметров по типу данных, их нормализация и выделение пороговых

значений, а также приведение к общему виду — $x \in [0, 1]$. Для всех параметров строятся иерархические зависимости с учётом приоритета их отображения на графическом интерфейсе, а также полноты информации.

На основании данной информации выбирается когнитивный образ, на основе которого строится КГИ [8]. Это может быть либо вспомогательное меню к основному интерфейсу рабочей среды, либо изменение в общей архитектуре системы отображения информации, либо частное изменение дизайна программы.

Рассмотрим пример формирования КГИ для поддержки принятия решения диспетчером СЦ в условиях возникновения аварии. Пусть аварийная ситуация S может быть описана 18-ю основными параметрами, которые могут быть объединены в три группы:

1. Сложность аварийной ситуации — классификация ситуации по результатам её автоматизированного анализа и информации базы знаний о её ликвидации (допустимый лимит времени на ликвидацию; уровень опасности аварии по регламентирующим документам; силы и средства, необходимые для её ликвидации).
 2. Опасность аварийной ситуации — перечень проблем и воздействий, с которыми столкнётся выездная ремонтная бригада (вероятность возникновения новых аварий в окрестностях, человеческие жертвы, наличие каких-либо внешних факторов (возгорание, обрыв проводов, утечка газа), экономические потери).
 3. Текущие метеоусловия — влияние погоды на сложность и опасность аварийной ситуации (температура воздуха, сила и направление ветра, наличие осадков, тумана или прочих метеовоздействий).
- Аналогичным образом может быть описано решение R , позволяющее ликвидировать аварийную ситуацию:

1. Состав выездной бригады — параметры, характеризующие непосредственно людей, входящих в её состав (количество свободных людей, их опыт работы, уровень развития навыков и знаний и т. д.).
2. Состав доступных средств — наличие или отсутствие инструментов, средств автоматизации и обмундирования, необходимых для ликвидации аварийной ситуации.
3. Логистика — параметры, характеризующие маршрут следования выездной бригады (наличие пробок, время в пути, состав автотранспорта, необходимость во вспомогательных средствах и т. д.).

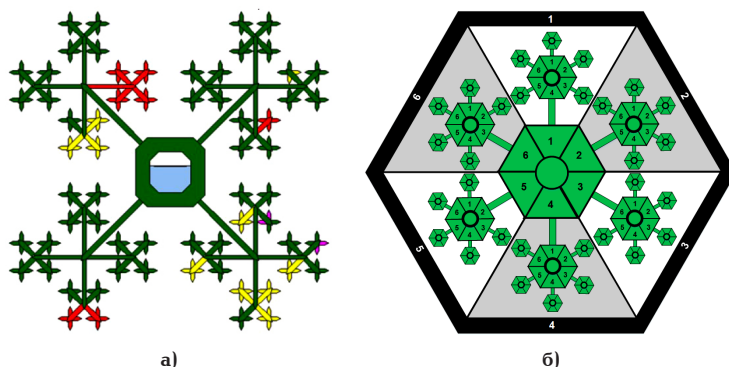


Рис. 2. Пример КГИ (фрактал Новоселова) для:
а) описания наличия аномалий в системе; б) отображения готовности элементов технической системы

Fig. 2. Example of the cognitive-graphical interface (Novoselov fractal) for:
а) describing the presence of anomalies in the system;
б) displaying the readiness of technical system elements

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

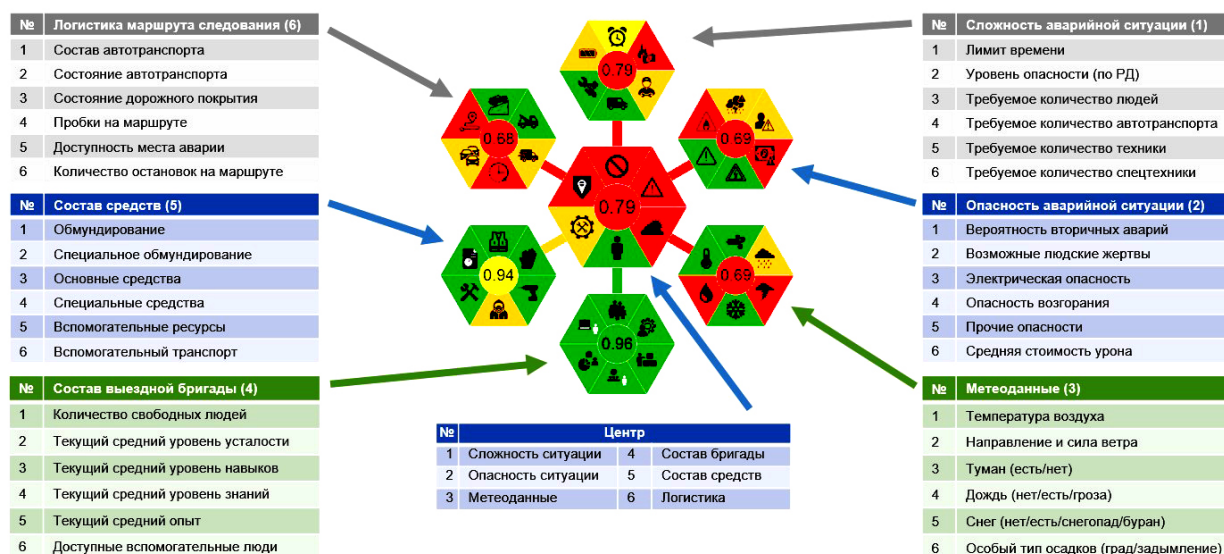


Рис. 3. Пример КГИ диспетчера СЦ агропромышленного предприятия

Fig. 3. Example of the cognitive graphical interface of the dispatcher of the situational center in the agro-industrial enterprise

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

В качестве критериев выберем три наиболее значимые, хотя их может быть и больше: t — время в пути; w — средневзвешенный опыт выездной бригады; T — время организации выездной бригады. На основании данных критериев будет осуществляться ранжирование решений. С учётом представленных параметров и критериев было принято решение реализовать КГИ в виде вспомогательного окна, позволяющего диспетчеру однозначно и оперативно оценить текущую аварийную ситуацию и предлагаемое ему решение с учётом представленных критериев.

КГИ на основе фрактала Новоселова

За основу вспомогательного меню для КГИ выбран когнитивный образ фрактала Новоселова⁴ (рис. 2). В его основе лежит представление информации в иерархической самоподобной структуре,

где каждый уровень детализации фрактала отражает различные аспекты решения — от общего значения критерия до его частных параметров. Цветовое кодирование, анимация и интерактивные элементы интегрируются в структуру фрактала, позволяя диспетчеру быстро идентифицировать аномалии и принимать обоснованные решения. Интерфейс стремится к минимальной когнитивной нагрузке. Все вышеуказанные особенности обуславливают выбор данного когнитивного образа для сопряжения с СППР СЦ.

Ключевым преимуществом фрактальной модели является её адаптивность к изменяющимся условиям, что достигается за счёт динамического перестроения уровней детализации в зависимости от значимости информации. Параметры визуализации, такие как контрастность C и цветовая дифференциация ΔE , подчиняются соотношению $C \cdot \Delta E \geq \theta$,

⁴ Новоселов Ю. В. Методы и программные средства когнитивной графики для интеллектуальных систем поддержки принятия решений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2013. 20 с.

где θ — порог восприятия, обеспечивающий мгновенное выделение критических данных [13, 14]. Методы когнитивной графики усиливают восприятие иерархии, сокращая время реакции диспетчера согласно зависимости $T_{\text{react}} = T_0 \cdot e^{-\beta \rho}$, где β — коэффициент когнитивной эффективности [15].

Экспериментальные исследования подтверждают [16], что фрактальные визуализации повышают скорость и точность принятия решений за счёт активации параллельных процессов обработки информации. Эффективность оценивается через показатель:

$$\eta = \frac{T_{\text{std}}}{T_{\text{frac}}} \cdot \frac{A_{\text{frac}}}{A_{\text{std}}}, \quad (8)$$

где T_{std} и T_{frac} — временные затраты для стандартного и фрактального интерфейсов соответственно; A_{frac} и A_{std} — соответствующие точности. Для фрактала Новоселова характерны высокие значения $\eta > 1.8$, что говорит о высоких эргономических показателях данного образа в рамках поддержки принятия решения.

Рассмотрим частный пример реализации КГИ (рис. 3) для решения задачи повышения оперативности принятия решения диспетчером СЦ. Ситуация S — поломка оборудования. Исходные данные: имеются машины для ликвидации аварии, присутствуют все бригады на смене, поломка достаточно проста, погодные условия в норме. Цвет на диаграмме отождествляет, насколько серьезное влияние оказывает фактор на ситуации с выполнением задачи: от зеленого — все в норме, до красного — параметр за пределами нормы.

При анализе предложенных решений, отображаемых на данном КГИ, диспетчер, во-первых, способен идентифицировать, какие характеристики данного решения являются «плохими», а какие — «хорошими». Во-вторых, при наведении курсора мыши на лепесток КГИ диспетчер может вызвать меню с развёрнутым сообщением о том, что привело к такому состоянию данного параметра.

Заключение

В статье представлено решение задачи повышения оперативности действий диспетчера ситуационного центра агропромышленного предприятия при ликвидации аварийных и нештатных ситуаций. На основе формализованной декомпозиции общего времени ликвидации аварии показано, что ключевым управляемым фактором, непосредственно влияющим на оперативность, является время анализа информации и принятия решения, которое зависит от метода поддержки принятия решения и качества графического интерфейса.

Разработан и обоснован подход к построению КГИ на основе фрактала Новоселова, реализующего иерархическую самоподобную структуру визуализации параметров аварийной ситуации. Предложенный КГИ позволяет интегрировать в единое интерактивное окно до 36 контролируемых параметров, сгруппированных по шести смысловым блокам (сложность ситуации, опасность, метеоусловия, состав бригады, доступные средства, логистика), что обеспечивает эргономичное представление взвешенной и ранжированной рекомендательной информации.

Показано, что применение КГИ на основе фрактала Новоселова позволяет сократить время анали-

за информации и принятия решения не менее чем на 30–40 % по сравнению с классическими интерфейсами без потери точности.

Полученные результаты позволяют сформулировать новые принципы проектирования СППР СЦ, базирующиеся на использовании когнитивных образов с фрактальной структурой. Новые принципы могут быть использованы при обновлении штатного программного обеспечения для мониторинга и управления сельскохозяйственной техникой.

Список источников / References

1. Жиздюк А. А., Буйлов В. Н., Чумакова С. В., Ахилбеков М. Н. Применение цифровых двойников технологических машин в АПК при эксплуатации и сервисном обслуживании // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 1. С. 20–25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25>. EDN: CCHMVF.
2. Zhizdyuk A. A., Builov V. N., Chumakova S. V., Akhilebekov M. N. Application of digital twins of technological farm machines during their operation and maintenance. *Agricultural Engineering*. 2025;27(1):20–25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25>. EDN: CCHMVF. (In Russ.).
3. Черныш А. П. Конструкторско-технологическое обеспечение надежности машин агропромышленного комплекса при ремонте путем формирования технологических ремонтных блоков: монография. Кемерово: Кузбасская ГСХА, 2013. 320 с. ISBN 978-5-902282-24-2. EDN: RJLYNP.
4. Chernysh A. P. Konstruktorsko-tehnologicheskoye obespecheniye nadezhnosti mashin agropromyshlennogo kompleksa pri remonte putem formirovaniya tekhnologicheskikh remontnykh blokov. Kemerovo, 2013. 320 p. ISBN 978-5-902282-24-2. EDN: RJLYNP. (In Russ.).
5. Подвесовский А. Г., Титарев Д. В., Исаев Р. А. Нечеткие когнитивные модели в задачах анализа и планирования программных проектов // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2019. № 8. С. 22–31. <https://doi.org/10.14489/vkit.2019.08.pp.022-031>. EDN: XBXEXX.
6. Podvesovskii A. G., Titarev D. V., Isaev R. A. Fuzzy cognitive models in software projects analysis and planning. *Herald of Computer and Information Technologies*. 2019;8: 22–31. <https://doi.org/10.14489/vkit.2019.08.pp.022-031>. EDN: XBXEXX. (In Russ.).
7. Паздерин А. В. Существующая система противоаварийной автоматизации Единой энергосистемы России и направления ее развития // Спецвыпуск «Россети». 2025. № 2 (37). С. 30–33. EDN: YHQBQU.
8. Pazderin A. V. The existing system of emergency control automation of the Unified Energy System of Russia and directions of its development. *Rosseti Special Issue*. 2025;2(37):30–33. EDN: YHQBQU. (In Russ.).
9. Листухин В. А. Перспективы внедрения информационно-измерительных систем контроля параметров ВЛ 0,4–10 кВ в сложных метеорологических условиях // Спецвыпуск «Россети». 2023. № 3 (30). С. 26–31. EDN: JRCNUF.
10. Listyukhin V. A. Prospects for the implementation of information-measuring systems for monitoring parameters of 0.4–10 kV overhead lines in difficult weather conditions. *Rosseti Special Issue*. 2023;3(30):26–31. EDN: YHQBQU. (In Russ.).
11. Подоплелова Е. С. Анализ методов многокритериального принятия решений на примере задачи ранжирования // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2023. № 3 (233). С. 118–125. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-3-118-125>. EDN: QWZEBE.
12. Podoplelova E. S. Analysis of multi-criteria decision-making methods on the example of the ranking problem. *Izvestiya YuFU. Engineering Sciences*. 2023;3(233):118–125. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-3-118-125>. EDN: QWZEBE. (In Russ.).

7. Пищулина Т. А. Проектирование схемы системы поддержки принятия решений на основе онтологии перекомпо-нуемого производства // Онтология проектирования. 2022. № 2 (44). С. 231–244. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2022-12-2-231-244>. EDN: UXPDWX.

Pishchukhina T. A. Designing a scheme of a decision support system based on the ontology of reconfigurable manufacturing. *Ontology of Designing*. 2022;2(44):231–244. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2022-12-2-231-244>. EDN: UXPDWX. (In Russ.).

8. Емельянова Ю. Г., Фраленко В. П. Методы когнитивно-графического представления информации для эффективного мониторинга сложных технических систем // Программные системы: теория и приложения. 2018. № 4. С. 117–158. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-4-117-158>. EDN: NYAUHE.

Yemel'yanova Yu. G., Fralenko V. P. Methods of cognitive-graphical representation of information for effective monitoring of complex technical systems. *Program Systems: Theory and Applications*. 2018;4:117–158. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-4-117-158>. EDN: NYAUHE. (In Russ.).

9. Емельянова Ю. Г. Разработка методов когнитивного отображения состояний динамических систем реального времени // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 3. С. 21–30. EDN: WWUTID.

Yemel'yanova Yu. G. Development of methods for cognitive mapping of states of real-time dynamic systems. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2016;3:21–30. EDN: WWUTID. (In Russ.).

10. Емельянова Ю. Г., Фраленко В. П., Хачумов В. М. Методы комплексного оценивания когнитивных графических образов // Программные системы: теория и приложения. 2018. Т. 9, № 3 (38). С. 49–63. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2017-9-3-49-63> EDN: YAJGJF.

Emelyanova Yu., Fralenko V., Khachumov V. Methods of complex estimation of cognitive graphic images. *Program Systems: Theory and Applications*. 2018;9(3):49–63. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2017-9-3-49-63>. EDN: YAJGJF. (In Russ.).

11. Paas F., Tuovinen J., Tabbers H. [et al.]. Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. *Educational Psychologist*. 2003;38(1):63–71. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_8.

12. Новикова С. И. Ритмы ЭЭГ и когнитивные процессы // Современная зарубежная психология. 2015. Т. 4, № 1. С. 91–108. EDN: TZJDZX.

Novikova S. I. EEG Rhythms and Cognitive Processes. *Journal of Modern Foreign Psychology*. 2015;4(4):77–86. <https://doi.org/10.17759/jmfp.2015040410>. (In Russ.).

13. Szafir D. A. Modeling color difference for visualization design. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2016;22(1):392–401. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2744359>.

14. Prudnikov S. I. Decision support model for intellectual property management. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. 2025;12(4):61–70. <https://doi.org/10.14529/jcem25040>.

15. Endert A., Ribarsky W., Turkay C. [et al.]. The state of the art in integrating machine learning into visual analytics. *Computer Graphics Forum*. 2017;36(8):458–486. <https://doi.org/10.1111/cgf.13092>.

16. Joye Y., Steg L., Unal A. [et al.]. When complex is easy on the mind: Internal repetition of visual information in complex objects is a source of perceptual fluency. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2016;1(42):103–114. <https://doi.org/10.1037/xhp0000105>.

Вклад авторов:

С. В. Мацевич. Разработка и формирование когнитивно-графического интерфейса, обоснование его состава и структуры, выбор когнитивного образа (фрактал Новоселова), реализация прототипа

интерфейса, подготовка и оформление иллюстративного материала, написание соответствующих разделов статьи.

А. В. Тимошенко. Постановка цели и задач исследования, разработка общей концепции и формальной модели (декомпозиция времени ликвидации аварийной ситуации), оценка полученных результатов, формулирование научных выводов, общая редакция текста.

В. А. Козырев. Сбор и подготовка исходных данных для разработки когнитивно-графического интерфейса (параметры аварийных ситуаций, состав бригад, логистические характеристики), обоснование состава и структуры интерфейса с учётом практических потребностей агропромышленного предприятия.

Г. М. Зюзин. Анализ актуальной научной литературы по когнитивной графике, системам поддержки принятия решений и эргономике интерфейсов, исследование предметной области, написание текста статьи (введение, обзор существующих подходов), редакция, приведение ссылоного аппарата в соответствие с требованиями.

А. В. Мацевич. Оценка когнитивной нагрузки разработанного интерфейса с использованием психофизиологических методов, исследование актуальных решений в области визуализации многопараметрических данных, написание текста статьи (описание экспериментальной оценки, обсуждение результатов), редакция, подготовка заключения.

Authors' contribution:

Sergey V. Matseevich. Development and formation of the cognitive-graphical interface, substantiation of its composition and structure, selection of the cognitive image (Novoselov fractal), implementation of the interface prototype, preparation and design of illustrative material, writing the relevant sections of the article.

Alexander V. Timoshenko. Formulation of the research aim and objectives, development of the general concept and formal model (decomposition of the emergency elimination time), evaluation of the obtained results, formulation of scientific conclusions, general editing of the text.

Vadim A. Kozyrev. Collection and preparation of initial data for the development of the cognitive-graphical interface (parameters of emergency situations, team composition, logistics characteristics), substantiation of the interface composition and structure considering the practical needs of the agro-industrial enterprise.

Gleb M. Zyuzin. Analysis of current scientific literature on cognitive graphics, decision support systems and interface ergonomics, research of the subject area, writing the text of the article (introduction, review of existing approaches), editing, editing the references.

Andrey V. Matseevich. Assessment of the cognitive load of the developed interface using psychophysiological methods, research of current solutions in the sphere of the visualization of multi-parameter data, writing the text of the article (description of the experimental evaluation, discussion of the results), editing, preparation of the conclusion.

Информация об авторах:

МАЦЕВИЧ Сергей Вячеславович, ассистент кафедры «Искусственный интеллект» Финансового уни-

верситета при Правительстве Российской Федерации, г. Москва.

SPIN-код: 5888-0320

AuthorID (РИНЦ): 1219969

AuthorID (SCOPUS): 57224201870

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1311-2194>

e-mail: cvmac@mail.ru

ТИМОШЕНКО Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационная безопасность» Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, г. Москва.

SPIN-код: 7172-8764

AuthorID (РИНЦ): 525742

AuthorID (SCOPUS): 57217674240

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>

e-mail: u567ku78@gmail.com

КОЗЫРЕВ Вадим Алексеевич, директор ООО «Тех-Сервис», г. Ярославль.

e-mail: zapchasti@t-srv76.com

ЗЮЗИН Глеб Максимович, заведующий кабинетом по метрологии и радиоизмерениям Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, г. Ярославль.

e-mail: glebzuzin245@gmail.com

МАЦЕЕВИЧ Андрей Вячеславович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Искусственный интеллект» Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, г. Москва.

SPIN-код: 9850-1442

AuthorID (РИНЦ): 812642

AuthorID (SCOPUS): 57196016987

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0512-7652>

e-mail: avmac@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 11.03.2026; одобрена после рецензирования 23.04.2026; принята к публикации 09.06.2026.

Information about the authors:

MATSEEVICH Sergey Vyacheslavovich, Assistant at the Artificial Intelligence Department, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow.

SPIN-code: 5888-0320

AuthorID (RSCI): 1219969

AuthorID (SCOPUS): 57224201870

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1311-2194>

e-mail: cvmac@mail.ru

TIMOSHENKO Alexander Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Information Security Department, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow.

SPIN-code: 7172-8764

AuthorID (RSCI): 525742

AuthorID (SCOPUS): 57217674240

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>

e-mail: u567ku78@gmail.com

KOZYREV Vadim Alekseevich, Director of Techservice LLC, Yaroslavl.

e-mail: zapchasti@t-srv76.com

ZYUZIN Gleb Maximovich, Head of the Metrology and Radio Measurements Office, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl.

e-mail: glebzuzin245@gmail.com

MATSEEVICH Andrei Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Lecturer of the Artificial Intelligence Department, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow.

SPIN-code: 9850-1442

AuthorID (RSCI): 812642

AuthorID (SCOPUS): 57196016987

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0512-7652>

e-mail: avmac@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 11.03.2026; approved after reviewing 23.04.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Научный журнал «Омский научный вестник» публикует оригинальные научные и обзорные статьи, соответствующие тематике журнала. Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).

При подготовке статьи к публикации в журнале необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.
2. **Заголовок статьи.** Должен кратко (не более 10 слов) и информативно отражать содержание статьи. Приводится на русском и английском языках.
3. **Инициалы и фамилии авторов,** место работы (полное название организации, индекс, страна, город, адрес, e-mail). Приводятся на русском и английском языках.
4. **Аннотация** (150–300 слов). Выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В аннотации должны быть обозначены основная тема, объект и цель исследования; материалы и методы; результаты исследования; общие выводы, область применения. Приводится на русском и английском языках.
5. **Ключевые слова** (6–8 слов или коротких словосочетаний). Должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. Приводятся на русском и английском языках.
6. **Основной текст статьи.** Рекомендуемые разделы: «Введение», «Материалы и методы», «Основная часть» и/или «Результаты исследования», «Обсуждение и заключение».
7. **Список источников** (оформляется в формате Vancouver). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов. Желательно использовать не менее 15–20 источников на русском и английском языках. В научных обзорах количество ссылок на источники информации должно быть не менее 25–30. В тексте статьи ссылки на источники приводятся в квадратных скобках арабскими цифрами.
8. **Информация об авторах** должна включать Ф.И.О., ученое звание и должность, организация(и), SPIN-код, Author ID,

ORCID ID, Researcher ID, Scopus ID, e-mail. Приводится на русском и английском языках.

9. **Вклад авторов.** В конце статьи разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. Приводится на русском и английском языках.

Техническое оформление:

- 1) редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx. Набор текста осуществляется с использованием шрифта Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Абзацный отступ — 0,5 см;
- 2) формулы следует набирать в редакторе MS Word Equation Editor или Math Type. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках;
- 3) рисунки должны иметь разрешение не ниже 300 dpi и быть сохранены в форматах JPEG, TIFF. Рисунки должны быть четкими. Все позиции на рисунке должны быть расшифрованы и описаны. Допускается не более 8 рисунков в статье. Каждый рисунок должен иметь подрисуючную подпись на русском и английском языках;
- 4) таблицы должны располагаться в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок на русском и английском языках.

В журнале принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) **рецензирование** статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации (без доработки или с доработкой) или об ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей. Публикация статей осуществляется на бесплатной основе. Журнал предоставляет непосредственный открытый доступ к своему контенту исходя из следующего принципа: свободный **открытый доступ** к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями.

INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

The *Omsk Scientific Bulletin* only publishes original scientific and review articles that correspond to the subject matter of the journal. Submission to the editorial office of previously published articles or articles sent for publication to other journals is not allowed. In the event of simultaneous submission of a manuscript to different journals, the published article will be retracted (withdrawn from print).

To submit an article in the journal you should know:

1. It is necessary to indicate the **UDC**.
2. **The title of the article** should briefly (no more than 10 words) and accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the conducted research. The title is to be provided in Russian and English.
3. **Authors' initials and surnames,** official name of institution without abbreviations, address of institution, e-mail.
4. **The abstract** (150–300 words) performs the function of an expanded title and informs readers about the article's content. It should comprise introduction, materials and methods, results, discussion and conclusion. The abstract is to be provided in Russian and English.
5. **Keywords** consist of the search terms used by all bibliographic databases to search for scientific articles by keyword. For this reason, the keywords should reflect the main statements, achievements, results and terminology of scientific research. The recommended number of keywords is 6–8. The keywords are to be provided in Russian and English.
6. **The main text of the article** is to be presented in Russian or English according to a specific sequence: Introduction, Materials and Methods, Results, Discussion and Conclusion.
7. **References.** The bibliographic description of the documents should conform to the requirements of the Vancouver Citation Style. It is necessary to refer first of all to original sources from scientific journals. It is advisable to use at least 15–20 sources in Russian and English. In scientific reviews, the number of references to information sources should be at least 25–30. In the text of the article, references to sources are given in square brackets in Arabic numerals.
8. **Information about authors.** Full surname, first name and any second names or patronymics of the authors; detailed information about the authors: scientific degree, position, official name of institution without abbreviations; SPIN-code, Author ID,

ORCID ID, Researcher ID, Scopus ID, e-mail. Information about authors is to be provided in Russian and English.

9. **Authors' contribution.** At the end of the article authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the research. Information about the contribution of authors is to be provided in Russian and English.

Technical preparation

- 1) the article file uploaded to the system must be in Microsoft Word format (with the extension *.doc, *.docx). The text is typed using the Times New Roman font, size 14 and an interval of 1.5 lines. An indentation of 0.5 is made at the beginning of each paragraph;
- 2) formulas are to be typed in MS Word Equation Editor or Math Type. Latin symbols in formulas and designations (both in text and images) are to be in italic. Formulas are to be numbered in round brackets;
- 3) images should be with a minimum resolution of 300 dpi and be saved in JPEG and TIFF formats. The figures should be clear. All positions in the figures must be deciphered and described. No more than 8 figures per article are allowed. The name of the figure is placed directly under the figure and should be presented in Russian and English;
- 4) the tables should be arranged in the text of the article. Each table should have a title in Russian and English.

The journal practices **double-blind peer review** of articles (neither the reviewer nor the author know each other's names). The reviewer analyses an article and decides whether it should be published (with or without corrections) or rejected. Where the author disagrees with the reviewer's comments, their substantiated statement is considered by the Editorial Board.

The editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics. Articles are published free of charge. The journal provides open access to its content and adheres to the principle that free **open access** to research findings helps increase global sharing of knowledge.

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

включен в **Перечень** рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Адрес редакции и издателя: 644050, Омская обл., г. Омск, пр. Мира, 11,
Омский государственный технический университет, корпус 6, каб. 424;
тел. (3812) 65-32-08; e-mail: onv@omgtu.ru

Адрес типографии: 644050, Омская обл., г. Омск, пр. Мира, 11,
Омский государственный технический университет, корпус 6, каб. 333;
тел. (3812) 65-32-08.
Цена свободная