

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

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

2026

№ 3 (199)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издаётся с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 3 (199) 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. Кенжалинова

Редактор
Т. П. Сёмина

Компьютерная верстка
О. Н. Чирун

Макет обложки
В. С. Гуринов

Подписано в печать 25.09.2026 г.
Дата выхода в свет 30.09.2026 г.

Формат 60х84 1/8.
14,42 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 98
Цена свободная

© ФГАУ ВО «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

ХАРАМОВ 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

№ 3 (199) 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

Signed in Print 25.09.2026
Date of Publication 30.09.2026

Format 60x84 1/8.
Conventional
Printed Sheets 14.42
Offset Paper

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

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100).
Order 98
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

А. А. Воробьев, А. В. Терентьев, О. Д. Покровская, А. А. Степанов, А. В. Курбатова. Моделирование аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда на защитный тоннель оболочечного типа	5
А. Ю. Попов, Е. В. Кривонос, Э. Р. Минибаев, В. Р. Аллагулов. Способ повышения жесткости и виброустойчивости нежестких концевых фрез при обработке щелевых пазов	16
В. Ю. Юрков, М. А. Чижик, С. Н. Литунев, С. С. Дубова. Локальная модификация геометрической формы плоских точечных множеств	23
С. Ю. Кайгородов. Разработка и расчётный анализ волнового гидродиода с профилем проточной части на основе кубических сплайнов	31
Е. А. Павлюченко, А. С. Павлюченко, А. А. Прусов. Математическое моделирование течения жидкости при перекрытии распределительных окон прямоугольного роторного насоса	39
М. С. Феддер. Критерии оценки качества контрматриц для холодного конгревного тиснения, изготовленных с применением аддитивных технологий	46
А. В. Степура, Е. В. Конопацкий. Моделирование экспоненциальных интерполяционных кривых в точечном исчислении	56
А. В. Рыбьяков, О. Г. Феоктистова, И. Н. Мерзликин. Применение CORSIA на территории России	66
А. Б. Яров. Функционально-воксельное моделирование зоны обнаружения радиолокационной станции с учётом влияния рельефа местности на основе аппарата R-функций	73

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

И. Н. Паскарь, А. С. Устюжанина, В. В. Артемасов. Обоснование предварительной мощности и схемы присоединения объекта распределенной генерации для населенного пункта с аномальным электропотреблением	80
М. Ю. Николаев, А. А. Татевосян. Моделирование электромагнитных полей взаимодействия в электроимпульсных системах	88
Л. А. Паюк, Н. А. Воронина, А. В. Глазачев, А. Д. Умурзакова, К. В. Хацевский. Проблемы цифровизации отказов асинхронного электропривода в сельском хозяйстве	97

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

С. О. Михин, В. А. Ганжа, О. Н. Кошкур. Технические и эксплуатационные требования к устройствам подготовки пробы сорбционно-емкостных преобразователей температуры точки росы по воде в природном газе	106
В. А. Дмитриев, С. А. Милюшенко, К. В. Беляев. Математическая модель печи первичной переработки нефти	117

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

A. A. Vorobyov, A. V. Terentyev, O. D. Pokrovskaya, A. A. Stepanov, A. V. Kurbatova. Simulation of aerodynamic impact of a high-speed train on a shell-type protective tunnel	5
A. Yu. Popov, E. V. Krivonos, E. R. Minibaev, V. R. Allagulov. Method of increasing the rigidity and vibration resistance of non-rigid end mills in processing slot grooves	16
V. Yu. Yurkov, M. A. Chizhik, S. N. Litunov, S. S. Dubova. Local modification of the geometric shape of planar point sets	23
S. Yu. Kaigorodov. Development and computational analysis of a wave hydrodiode with a flow path profile based on cubic splines	31
E. A. Pavlyuchenko, A. S. Pavlyuchenko, A. A. Prusov. Mathematical modeling of fluid flow during the closure of distribution ports in a straight-tooth rotary pump	39
M. S. Fedder. Criteria for assessing the quality of additively manufactured counter-matrices for cold embossing	46
A. V. Stepura, E. V. Konopatskiy. Modeling exponential interpolation curves in point calculus	56
A. V. Rybiakov, O. G. Feoktistova, I. N. Merzlikin. CORSIA application in Russia	66
A. B. Yarov. Functional voxel modeling of the radar detection zone considering the terrain influence by the R-function apparatus	73

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

I. N. Paskar, A. S. Ustyuzhanina, V. V. Artemasov. Justification of preliminary sizing and interconnection scheme for a distributed generation unit serving an area with abnormal power demand	80
M. Yu. Nikolaev, A. A. Tatevosyan. Modeling of electromagnetic interaction fields in pulsed power systems	88
L. A. Payuk, N. A. Voronina, A. V. Glazachev, A. D. Umurzakova, K. V. Khatsevskiy. Problems of digitalizing failure analysis of asynchronous electric drives in agriculture	97

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND CONNECTION

S. O. Mikhin, V. A. Ganzha, O. N. Koshkur. Technical and operational requirements for sample conditioning devices of sorption and capacitance dew point temperature transducers for water in natural gas	106
V. A. Dmitriev, S. A. Milyushenko, K. V. Belyaev. Mathematical model of the oil primary processing furnace	117

УДК/UDC 625.032.6

DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-5-15>

EDN: VRYHQN

Научная статья/Original article

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА НА ЗАЩИТНЫЙ ТОННЕЛЬ ОБОЛОЧЕЧНОГО ТИПА

А. А. Воробьев¹, А. В. Терентьев², О. Д. Покровская²✉,
А. А. Степанов², А. В. Курбатова²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 9

²Государственный университет управления,
Россия, 109542, г. Москва, пр. Рязанский, 99

✉ insight1986@inbox.ru

Исследован режим нагружения мембранной оболочки наземного тоннеля под аэродинамическим воздействием высокоскоростного поезда. Численно решена сопряжённая задача аэродинамики и механики деформируемого твёрдого тела на основе осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса и метода конечных элементов.

Установлено, что определяющими параметрами нагружения является длина тоннеля и относительный воздушный зазор, контролирующий интенсивность поршневого эффекта. Максимальное воздействие создаёт знакопеременный импульс в области головного обтекателя; хвостовая зона характеризуется развитой турбулентностью и струйно-отрывными течениями. Сравнительный анализ гладкой и гофрированной оболочек, а также усиленного каркаса выявил конструктивное решение, сочетающее аэродинамическую эффективность и устойчивость к боковым нагрузкам. Ресурс при циклическом нагружении оценён по модели накопления повреждений Палмгрена—Майнера и кривым усталости.

Научная новизна заключается в единой вычислительной методологии, объединяющей аэродинамическое моделирование, прочностной анализ и усталостные оценки применительно к наземным тоннелям оболочечного типа. Результаты предназначены для оптимизации геометрических параметров и повышения долговечности защитных сооружений.

Ключевые слова: конструкция тоннеля, деформация, взаимодействие поезд—тоннель, аэродинамические нагрузки, поршневой эффект, метод Frozen Rotor

Для цитирования: Воробьев А. А., Терентьев А. В., Покровская О. Д., Степанов А. А., Курбатова А. В. Моделирование аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда на защитный тоннель оболочечного типа. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 5—15. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-5-15>. EDN: VRYHQN.



© Воробьев А. А., Терентьев А. В., Покровская О. Д.,
Степанов А. А., Курбатова А. В., 2026.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

SIMULATION OF AERODYNAMIC IMPACT OF A HIGH-SPEED TRAIN ON A SHELL-TYPE PROTECTIVE TUNNEL

A. A. Vorobyov¹, A. V. Terentyev², O. D. Pokrovskaya²✉,
A. A. Stepanov², A. V. Kurbatova²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Moskovsky Ave., 9, Saint Petersburg, 190031, Russia

²State University of Management,
Ryazansky Ave., 99, Moscow, 109542, Russia

✉ insight1986@inbox.ru

The article presents the research of the loading regime of a membrane shell of an above-ground tunnel under the aerodynamic impact of a high-speed train. The authors solve the coupled problem of aerodynamics and deformable solid mechanics numerically by the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the finite element method.

Moreover, it is established that the governing loading parameters are the tunnel length and the relative air gap, which controls the intensity of the piston effect. The maximum impact is produced by an alternating-sign pressure pulse in the region of the head nose cone; the tail zone is characterised by the developed turbulence and jet-separation flows. By the comparative analysis of smooth and corrugated shells, as well as a reinforced frame, the authors identify a structural solution combining aerodynamic efficiency and resistance to lateral loads. The service life under cyclic loading is assessed using the Palmgren-Miner damage accumulation rule and fatigue curves.

The scientific novelty consists in a unified computational methodology integrating aerodynamic modeling, stress-strain analysis and fatigue assessment as applied to above-ground shell-type tunnels. The results are intended for optimizing geometric parameters and improving the durability of protective structures.

Keywords: tunnel construction, deformation, train and tunnel interaction, aerodynamic loads, piston effect, Frozen Rotor method

For citation: Vorobyov A. A., Terentyev A. V., Pokrovskaya O. D., Stepanov A. A., Kurbatova A. V. Simulation of aerodynamic impact of a high-speed train on a shell-type protective tunnel. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):5–15. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-5-15>. EDN: VRYHQN. (In Russ.).



© Vorobyov A. A., Terentyev A. V., Pokrovskaya O. D.,
Stepanov A. A., Kurbatova A. V., 2026.

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

Введение

Развитие железнодорожного транспорта требует создания высокоширотных транспортных коммуникаций значительной протяжённости с оптимизированным энергопотреблением. Такой подход обеспечивает экономическую эффективность и экологическую безопасность эксплуатации в сложных климатических условиях Арктической зоны и регионов Крайнего Севера.

Эффективным средством преодоления сложного рельефа местности, является устройство тоннельных сооружений, позволяющих значительно сокращать протяженность трасс, обеспечивать безопасность и бесперебойность движения транспорта в любых климатических условиях с обеспечением необходимого скоростного режима.

Сооружение тоннельных конструкций может оказаться столь же эффективным и для путей, расположенных на открытой местности. Особенно это актуально для высокоширотных железнодорожных магистралей, где проблема снегоборьбы является крайне энергозатратной. Легкая защитная конструкция оболочечного типа позволяет обеспечить условия микроклимата во внутреннем пространстве сооружения, устранив воздействие ускорен-

но движущихся приземных воздушных масс, образования снежных отложений на поверхностях верхнего строения пути и элементов ходовой части подвижного состава, а также связанных с этим последствий.

Эксплуатация подобных сооружений имеет определенную специфику, связанную с особенностями аэродинамического взаимодействия движущегося состава и мембраной оболочки тоннеля. В зазоре, образованном корпусом поезда и мембраной, происходит ускоренное вытеснение объемов воздушных масс поступательно движущимся корпусом поезда, что вызывает формирование волн сжатия и разряжения текучей среды, вызывающее колебание давления воздушной среды и, соответственно, динамики нагружения мембраны.

Характер распределения волн зависит от сочетания ряда факторов: скорости движения подвижного состава, длины тоннеля и значения коэффициента блокирования (отношение площадей поперечного сечения тоннеля и поезда). Оптимальное сочетание этих факторов напрямую определяет энергоэффективность эксплуатации подвижного состава. Задача осложняется дополнительными ограничениями по критерию несущей способности материала мем-

браны: наличие движущегося знакопеременного импульса давления воздушной среды, приложенного к внутренней поверхности мембраны, может спровоцировать образование усталостных разрушений конструкции.

Безусловно применение надземных тоннелей оболочечного типа на начальном этапе предполагает значительные капитальные затраты на возведение конструкций, вместе с тем перспективы снижения затрат на эксплуатацию инфраструктуры и подвижного состава, а также возможности для интеграции дополнительных технологий (солнечной генерации для энергообеспечения, защиты прилегающих экосистем) делают эту технологию перспективной.

Целью исследования является комплексный анализ влияния аэродинамических возмущений, возникающих при движении подвижного состава в зазоре между его корпусом и мембраной лёгкого тоннельного сооружения, на напряжённно-деформированное состояние защитной оболочки наземного тоннеля.

Научная новизна заключается в:

- установлении количественных зависимостей между параметрами движения поезда, характеристиками воздушного потока и уровнями напряжений в мембране;

- разработке расчётной модели взаимодействия системы «подвижной состав — воздушный зазор — мембрана»;

- формировании критериев проектирования лёгких тоннельных конструкций с учётом аэродинамических нагрузок.

Теоретическая значимость разработки определяется ее вкладом в развитие междисциплинарных исследований на стыке аэродинамики, механики деформируемого тела и транспортного строительства. Новизна подхода состоит в:

- комплексном анализе нестационарного взаимодействия подвижного состава и защитной оболочки тоннеля через возмущённый воздушный поток;

- создании расчётной модели, учитывающей взаимное влияние скорости движения, геометрии зазора и жёсткости мембраны;

- выявлении критических параметров системы, приводящих к опасным напряжениям и деформациям;

- формировании теоретической базы для проектирования энергоэффективных и устойчивых лёгких тоннельных конструкций.

Основные допущения, принимаемые при численных исследованиях аэроупругого взаимодействия движущегося подвижного состава и искусственных сооружений

Для получения полей скоростей и давлений уравнения Навье—Стокса и неразрывности решаются численно. С целью снижения вычислительных затрат приняты следующие допущения.

1. Воздух считается несжимаемой средой, поскольку скорость движения состава ниже порога 0,3 скорости звука (около 367 км/ч).

2. Деформации обтекаемых поверхностей не учитываются — принята гипотеза абсолютной жёсткости стенок тоннеля и корпуса поезда.

3. Твёрдые стенки полагаются гладкими, непроницаемыми и с условием прилипания; на открытых границах задаётся свободное течение (отсутствие тангенциальных напряжений).

4. Воздух рассматривается как ньютоновская жидкость с постоянной температурой 20 °С и динамической вязкостью $18,1 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Конвективный теплообмен и гравитационные эффекты не учитываются.

Совокупность этих допущений формирует основу численной модели аэродинамического нагружения.

Научной основой для совершенствования норм проектирования и эксплуатации лёгких наземных тоннелей сооружений может стать комплексный подход к изучению процесса взаимодействия подвижного состава и конструкции сооружения.

Теоретическую базу исследования влияния возмущённого состояния воздушных масс в зазоре «корпус подвижного состава — мембрана лёгкого тоннельного сооружения» на напряжённно-деформированное состояние мембраны составляет аэродинамика нестационарных течений вязкого газа в ограниченных пространствах, а именно закономерности формирования аэродинамических нагрузок при движении тела; модели турбулентных пульсаций и вихреобразования в стеснённых условиях (в ограниченном канале); методы расчёта пограничного слоя вблизи твёрдых поверхностей.

В системе «подвижной состав — воздушный зазор — мембрана» рассматриваются следующие физические процессы и их взаимосвязи:

- инициирующий аэродинамический процесс: движение поезда создаёт возмущение воздушного потока в зазоре, где возникают вихревые структуры и турбулентные пульсации. В результате чего формируются области повышенного и пониженного давления;

- механический отклик конструкции тоннеля заключается в совершении конструкцией вынужденных колебаний под действием давления воздушной среды, воздействующей на поверхность мембраны, которые могут приводить к усталостным повреждениям мембраны.

1. Механика жидкости и газа.

Уравнение Навье—Стокса для вязкого сжимаемого газа:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = \mu \Delta \vec{V} - \nabla P + \vec{f},$$

где ρ — плотность воздуха; $\vec{V}$ — вектор скорости; P — давление; μ — динамическая вязкость; $\vec{f}$ — вектор массовых сил.

Уравнение Рейнольдса для турбулентных течений:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v_i' v_j'} \right),$$

где $\bar{V}_i$ — осредненная компонента скорости; $\bar{P}$ — осредненное давление; v_i' , v_j' — пульсационные составляющие скорости.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0.$$

Для несжимаемой жидкости при $\rho = \text{const}$ уравнение сводится к условию:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0.$$

2. Механика деформируемого твердого тела.

К механике деформируемого твердого тела относятся: теория упругости и пластичности, расчет тонкостенных конструкций и оболочек, а также модели накопления повреждений и усталостного разрушения.

Линейная упругость для изотропного тела описывается законом Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij},$$

где λ и G — упругие постоянные Ламе; ε_{ij} — тензор малых деформаций; δ_{ij} — символ Кронекера.

Пластичность может быть описана условием текучести Мизеса:

$$f(\sigma_{ij}) = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} - \sigma_Y \leq 0, \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}.$$

Ассоциированный закон течения записывается в виде:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}.$$

Полная деформация раскладывается на упругую и пластическую части:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p.$$

Основы расчета тонкостенных конструкций и оболочек включают уравнения равновесия безмоментной мембранной оболочки вращения при осесимметричном нагружении:

$$\frac{N_\varphi}{R_1} + \frac{N_\theta}{R_2} = p_n, \quad \frac{d(N_\varphi r)}{ds} - N_\theta \cos \varphi = 0,$$

где N_φ , N_θ — погонные меридиональное и окружное усилия; R_1 , R_2 — главные радиусы кривизны; p_n — нормальное давление; r — радиус параллельного круга. Для протяженных цилиндрических оболочек учитываются также изгибные моменты и перерезывающие силы. Это приводит к моментной теории, включающей оператор $\nabla^4 w$ для прогиба w .

Критерии прочности и устойчивости мембран при динамическом нагружении

Условие прочности задает требованием, чтобы максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу не превышало допустимого значения:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma].$$

Условие устойчивости цилиндрической оболочки при внешнем давлении может быть записано через критическое напряжение и критическое давление:

$$\sigma_{cr} = \frac{Eh}{R\sqrt{3(1-\nu^2)}}, \quad p_{cr} = \frac{\sigma_{cr} h}{R},$$

где E — модуль упругости; h — толщина; R — радиус; ν — коэффициент Пуассона. При динамическом воздействии дополнительно учитывается коэффициент динамичности.

Кривая усталости Велера имеет вид:

$$N = N_0 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_0} \right)^{-m} \quad \text{или} \quad \sigma_a^m N = \text{const},$$

где σ_a — амплитуда напряжений; N — число циклов до разрушения; m и N_0 — константы материала.

Линейное правило накопления повреждений Палмгрена — Майнера:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1,$$

где n_i — число циклов с амплитудой $\sigma_{a,i}$; N_i — соответствующее разрушающее число циклов. При $D = 1$ прогнозируется усталостное разрушение.

Для малоциклового усталости применяется соотношение Коффина — Мэнсона:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c.$$

Для решения задачи применяется метод конечных элементов для расчёта напряжённо-деформированного состояния конструкций, вариационные принципы механики деформируемого тела и теория предельного состояния (критерий Мизеса и др.).

Процесс взаимодействия газа и конструкции Fluid-Structure Interaction (FSI) представлен моделями сопряжённого расчёта аэродинамических и механических процессов. Модели реализуют алгоритмы передачи нагрузок между расчётными доменами с учётом обратной связи: деформация мембраны изменяет геометрию зазора, — это влияет на характеристики воздушного потока, — формируется замкнутая система взаимодействий.

Оценка возможности резонансных явлений при вынужденных колебаниях мембраны под действием периодических аэродинамических сил осуществляется после расчёта собственных частот и форм колебаний конструкции с помощью механической модели. Для описания процессов используется следующий математический аппарат: в аэродинамическом домене — методы моделирования крупных вихрей (LES); в механическом домене — уравнения равновесия теории упругости с учётом динамических членов; на границе раздела — условия непрерывности скоростей и равенства сил.

Адекватное описание нестационарного аэродинамического воздействия на мембрану и соответствующий расчёт ее динамического напряжённо-деформированного состояния с учетом нелинейных эффектов (геометрическая и физическая нелинейность) осуществляются моделированием нестационарных процессов в программных комплексах (SolidWorks, COMSOL) с передачей данных между аэродинамическим и структурным решателями.

Актуальным остаётся изучение динамики воздушной среды в тоннелях оболочечного типа, влияющей на нагрузки и деформации. Эти особенности должны учитываться в конструктивных решениях [1–11]. Анализ литературы [1, 2, 6–11] и [3, 5] выявил дефицит исследований влияния нагрузок на такие конструкции [9–11].

В работе [1] численно смоделированы аэродинамические процессы в тоннелях метрополитена с учётом «поршневого» эффекта. Выявлен сложный режим течения воздуха с локальными фронтами сжатия и разрежения, особенно в конфузторных зо-

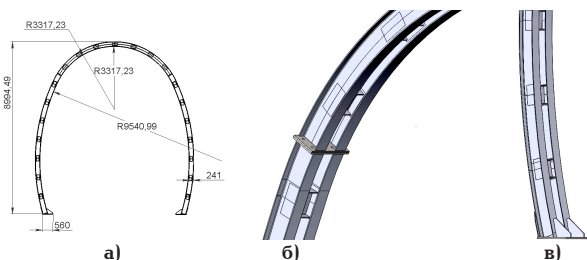


Рис. 1. Устройство опорных элементов оболочки тоннеля:
а — общий вид; б — средняя часть опоры;
в — нижняя часть опоры

Fig. 1. Arrangement of supporting elements of the tunnel shell:
а — general view; б — middle part of the support;
в — lower part of the support

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

нах порталов. Гибридная CFD-модель (SolidWorks Flow Simulation) с натурными данными показала, что поршневой эффект значительно меняет структуру воздухообмена.

В работе [10] численно исследованы поля скоростей у порталной зоны. Установлена турбулентная структура воздушных масс в зазоре между поездом и обделкой при входе и выходе состава, вызывающая повышенное сопротивление, и определены закономерности колебаний давления у головного обтекателя.

Для тоннельного сооружения оболочечного типа важны особенности эксплуатации при импульсных нагрузках от вытесняемого воздуха. Увлекаемая поездом масса, встречая изменения проходного сечения, вызывает знакопеременный импульс: повышенное давление перед обтекателем и разрежение за ним [1–4].

Таким образом, расчетная схема типовой секции тоннеля представляет собой несущий каркас опоры и фрагмент мембраны. Конструкция испытывает комбинированное нагружение:

- с внешней стороны на оболочку действует статическая составляющая (ветровое давление, снеговая нагрузка, перепады температуры);

- изнутри — динамическая нагрузка, порождаемая движущимся знакопеременным импульсом давления, формирующимся при прохождении поезда (область повышенного давления перед головной частью и зона разрежения за пределами головной части).

Конструктивное устройство защитного тоннеля представлено на рис. 1. Тонкостенная оболочка, выполненная из изолирующих материалов (сталь, полимерный композит), поддерживается периодически установленными опорными сварными металлоконструкциями из элементов фасонного профиля. Форма опор, задающая поперечное сечение тоннеля, принята параболической, что способствует рациональному распределению аэродинамических нагрузок и снижению концентрации напряжений (рис. 1а, б, в).

В рамках исследования рассматриваются ключевые критерии, охватывающие комплексный анализ аэродинамического взаимодействия поезда с тоннелем-оболочкой. Прежде всего оценивается прямое аэродинамическое воздействие, включающее порш-

невой эффект со сжатием воздуха перед составом и разрежением позади него. Оптимизация воздушного зазора между поездом и обделкой предполагает выбор между тоннелем полного сечения (1:1) с большим зазором, снижающим сопротивление, но удорожающим строительство, и уменьшенными вариантами (80 и 60 % от исходного), где меньший зазор повышает аэродинамическое сопротивление и нагрузку на корпус. Усталостные расчеты оболочки учитывают циклические нагрузки, возникающие при движении по магистрали, въезде и выезде, которые определяют прочностные характеристики конструкции, а также применение коррозионно-стойких и прочных материалов для обеспечения долговечности.

Анализируются формы оболочки: гладкая поверхность создает более стабильный поток и снижает сопротивление, тогда как гофрированная поверхность повышает жесткость ценой роста сопротивления. Для обеспечения комфорта и безопасности пассажиров исследуются шумы и вибрации с целью их минимизации, а также системы вентиляции и безопасности, предотвращающие накопление вредных веществ и оснащенные средствами быстрого реагирования и эвакуации. Наконец, учитываются экономические и экологические аспекты: энергоэффективные аэродинамические решения сокращают затраты на перевозки и улучшают экологическую устойчивость, а строительство должно минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, включая шумовое загрязнение и влияние на местные экосистемы.

Габаритные размеры проходного сечения выбраны на основе многокритериального анализа, удовлетворяющего следующим требованиям:

- обеспечение оптимального воздушного зазора между поездом и стенкой тоннеля, критически влияющего на аэродинамические нагрузки и капитальные затраты;

- минимизация аэродинамического сопротивления движению поезда за счет исключения турбулентности путем создания достаточно минимального зазора, предотвращающего интенсивное формирование волн сжатия и разрежения и, соответственно, снижения силового воздействия воздушного потока на несущие конструкции тоннеля;

- компенсационный запас по габариту, учитывающий динамические колебания подвижного состава (крены, виляния), температурные расширения и возможные деформации обделки в эксплуатации;

- резерв для технического обслуживания и ремонта, включая доступ к инженерным коммуникациям и элементам инфраструктуры.

В зонах повышенных нагрузок [1–4], вызванных циклическим сжатием и растяжением несущих элементов от колебаний давления воздушных масс, необходима оценка усталостных явлений, возникающих в элементах.

Исходные данные моделирования

Тоннель-оболочка, предлагаемая для защиты железных дорог и подвижного состава, подвержена воздействию аэродинамических сил от движения поездов с внутренней стороны и внешним со стороны бокового ветра¹. Оболочка тоннеля выполнена

¹ Белорусские инженеры разработали проект дублера Северного морского пути. URL: <https://naked-science.ru/article/column/proekt-dublera-severnogo> (дата обращения: 10.01.2026).

Таблица 1. Данные для SolidWorks [18]
Table 1. Data in SolidWorks [18]

Наименование параметра модели	Значение
Скорость движения состава	200 км/ч
Отношение площади тоннеля $S_{\text{тун}}$ / поезда $S_{\text{п}}$	5,6 (64 / 11,4)
Отношение длины тоннеля $L_{\text{тун}}$ на длину поезда $L_{\text{п}}$	1,5 (382 / 250)
Дистанция удаления хвостового вагона относительно портала	50 м
Число Рейнольдса	$0,49e + 5$
Кинематическая вязкость ν	$1,5 \cdot 10^{-5}$ (м ² / с)
Динамическая вязкость η	18,1 (мПа·с)
Плотность воздушной среды ρ	1,204 (кг/м ³)
Шероховатость поверхности тоннеля μ	realwall (6,0 мкм)
Шероховатость поверхности поезда μ	realwall (5,0 мкм)
Подвижной состав	Velaro RUS Sapsan
Тип пути	Безбалластный
Технология решателя	frozen rotor
Коэффициенты моделей турбулентности k, ε	$k = 1, \varepsilon = 1$
Коэффициент блокировки β [10]	0,18 – 0,30

из коррозионностойкой рулонной стали. Данные, вводимые в SolidWorks, указаны в табл. 1.

Численные исследования проведены в программном комплексе SolidWorks поэтапно:

1) с помощью метода «Frozen Rotor» получена стационарная картина распределения давления от воздушного потока в секции тоннеля;

2) при использовании граничных условий предыдущего этапа в модуле SolidWorks Simulation получены поля напряжения и деформации несущих конструкций.

Результаты моделирования

Результаты моделирования показали, что при «входе» головной части поезда в тоннель наблюдается резкое увеличение давления (так называемый «поршневой эффект») [6–9], а затем давление резко падает. При соотношении площади поперечного сечения поезда к площади поперечного сечения тоннеля $\frac{11,4 \text{ м}^2}{64 \text{ м}^2} = 0,178 \approx 17,8\%$ (максимальный зазор) наблюдается наименьшее сопротивление воздуха. При размере тоннеля в масштабе 60 % от изначального наблюдается большее сопротивление и повышенное взаимодействие воздуха с корпусом поезда (табл. 2).

Полученные результаты (рис. 2) сопоставляются с данными в литературе [11] в контексте перепада давления при движении поезда в тоннеле².

Изменения давления, воспринимаемые поездом при движении в тоннеле, вызваны его взаимодействием с собственными волнами давления, сформированными носовой и хвостовой частями состава. На рис. 3 эти изменения представлены как моменты пересечения траектории движения поезда с линиями волн [10–12]. Помимо волновой структуры данный рисунок позволяет детально рассмотреть распределение скоростей и характер линий потока в области соприкосновения внешнего течения

с поверхностью поезда. Визуально выделены основные режимы течения: основной поток, характеризующийся наибольшей скоростью и относительно однородной структурой; пограничный слой, образующийся вдоль поверхности поезда вследствие трения и сопровождающийся снижением скорости; ламинарное течение, наблюдаемое на начальных этапах течения, когда течение упорядочено и слоисто; турбулентное течение, возникающее вследствие увеличения неустойчивости в потоке и проявляющееся интенсивным перемешиванием слоёв. Наличие развитой области турбулентности указывает на значительное аэродинамическое сопротивление и способствует образованию дополнительных нагрузок на конструктивные элементы.

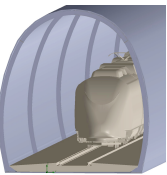
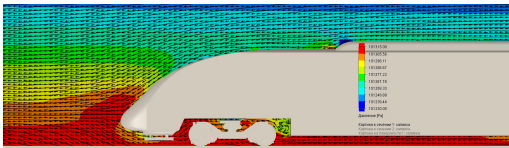
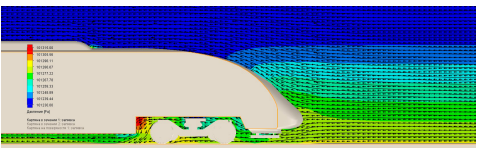
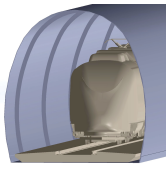
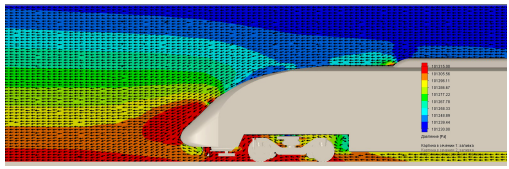
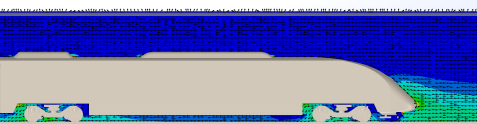
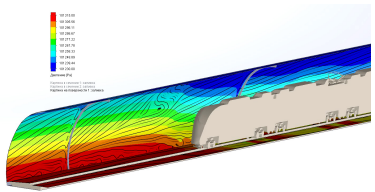
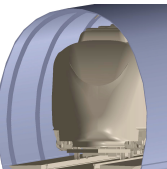
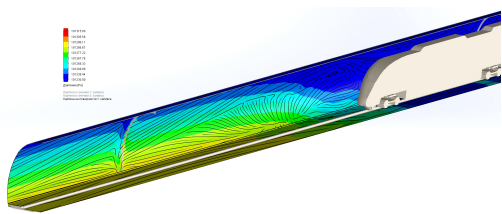
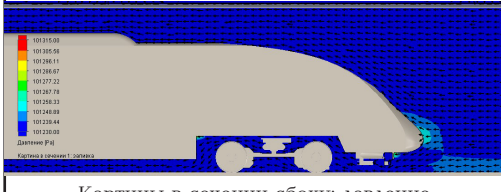
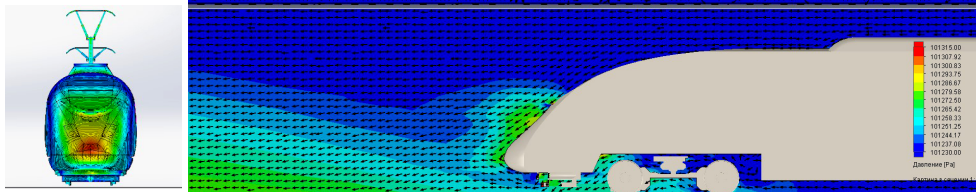
Специалисты А. Martinez, Е. Vega, J. Gaite и J. Meseguer (Испания) также определили колебания давления в тоннеле Сагидес [5] (рис. 3), показывая принципиальное отличие аэродинамического сопротивления при движении в туннеле и на открытом воздухе.

Эти результаты представляют интерес прежде всего с точки зрения определения зависимости параметров поезда и тоннеля, а именно: в результате исследования установлено, что конфигурация фронта давления носит постоянный характер, а время между изменениями зависит от длины тоннеля и скорости движения подвижного состава. Обнаружены вариации избыточного давления на головном обтекатель при въезде в тоннель.

В ходе настоящего исследования было установлено, что максимальная амплитуда давления имеет знакопеременный импульс, образующийся в районе головного обтекателя поезда. Область разрежения, формирующаяся на хвостовом обтекатель состава, по амплитуде значительно меньше головного импульса, характеризуется высокой турбулентностью, с образованием струйно-отрывных течений воздушной среды. Для высокоскоростного поез-

² Аэродинамика скоростных поездов: почему ветер не мешает TGV. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/10632-protiv-vetra-aerodinamika/> (дата обращения: 10.01.2026).

Таблица 2. Результаты моделирования
Table 2. Simulation results

Исследуемая модель	Результаты	
Тоннель I (64 м²) 	 Картинки в сечении, вид сбоку: давление и распределение потоков в передней части поезда	 Картинки в сечении, вид сбоку: давление и распределение потоков в задней части поезда
Тоннель II (0,8 от тоннеля I) 	 Картинки в сечении, вид сбоку: давление и распределение потоков в передней части поезда	 Картинки в сечении, вид сбоку: давление и распределение потоков в задней части поезда
	 Картинки на поверхности тоннеля: распределение давления вблизи корпуса поезда	
Тоннель III (0,6 от тоннеля I) 	 Картинки на поверхности тоннеля: распределение давления вокруг поезда	 Картинки в сечении сбоку: давление и распределение потоков в задней части поезда
	 Картинки в сечении сбоку: давление и распределение потоков в передней части поезда	

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

да длиной до 250 м основную часть энергозатрат на преодоление сопротивления движению составляет боковое сопротивление (сопротивление обшивки) [10]. К аналогичным выводам приходят авторы исследований [12–18].

На рис. 4 показано распределение скоростей и характер линий потока в области соприкосновения внешнего потока с поверхностью поезда. Визуально выделены основные режимы течения: основной поток, характеризующийся наибольшей скоростью и относительно однородной структурой; пограничный слой, образующийся вдоль поверхности поезда вследствие трения и сопровождающийся снижением скорости; ламинарное течение, наблюдаемое на начальных этапах течения, когда течение

упорядочено и слоисто; турбулентное течение, возникающее вследствие увеличения неустойчивости в потоке и проявляющееся интенсивным перемешиванием слоев. Наличие развитой области турбулентности указывает на значительное аэродинамическое сопротивление и способствует образованию дополнительных нагрузок на конструктивные элементы.

Выводы

На основе выполненных численных исследований сформулированы следующие выводы.

Аэродинамическая обстановка и напряжённо-деформированное состояние тоннеля оболочечного типа определяются поршневым эффектом, ключе-

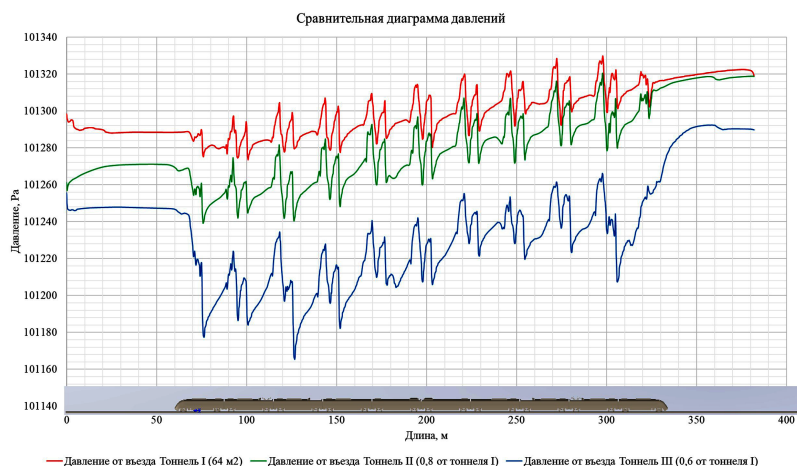


Рис. 2. Сравнительная характеристика перепадов давления в зависимости от сечения тоннеля (направление движения поезда вправо)
Fig. 2. Comparative characteristics of pressure drops depending on the tunnel cross-section (the direction of movement of the train is to the right)
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

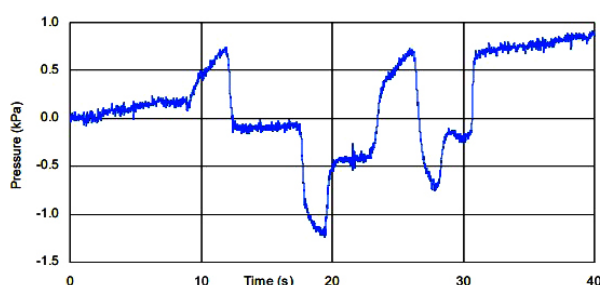


Рис. 3. Колебания давления в туннелях Сагидес (длина — 1786 м, площадь — 100 м²) [18]
Fig. 3. Pressure fluctuations in the Sagides tunnels (length — 1786 m, area — 100 m²) [18]

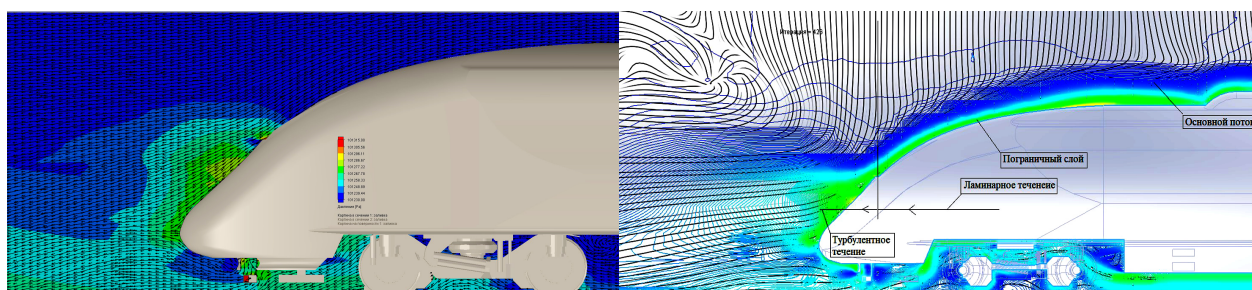


Рис. 4. Фрагмент турбулентных срывов [18]
Fig. 4. Fragment of turbulent disruptions [18]

выми параметрами которого являются длина сооружения и относительный воздушный зазор. Короткие тоннели реализуют режим «открытой» системы, не успевая сформировать устойчивую зону сжатия; длинные тоннели действуют как «сжимаемая пружина» с резким нагнетанием давления на входе и квазистационарным течением в средней части. Малый зазор усиливает поршневой эффект и градиенты давления, большой — ослабляет, приближая обтекание к условиям открытого пространства при сохранении специфики замкнутого объёма.

Максимальное воздействие создаёт знакопеременный импульс в области головного обтекателя. Хвостовая область при меньшей амплитуде характеризуется развитой турбулентностью и струйно-отрывными течениями, вносящими заметный вклад

в сопротивление. Для поездов длиной до 250 м основную долю сопротивления составляет боковое сопротивление обшивки, что делает критичным учёт пограничного слоя и турбулентности при проектировании оболочек.

Циклический характер нагружения инициирует накопление усталостных повреждений в несущих элементах и обшивке, что требует проведения специализированных усталостных расчётов и локального усиления в зонах с максимальной амплитудой напряжений.

Результаты исследования создают научно-техническую основу для разработки конструктивных мероприятий, обеспечивающих снижение аэродинамического сопротивления, повышение несущей способности и гарантированный ресурс оболочки

тоннеля в условиях эксплуатации высокоскоростных поездов.

Финансирование / Funding

Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования — Минобрнауки РФ) по теме: «Научные, методологические и практические основы разработки и применения интеллектуальных технологий и систем поддержки принятия решений с учетом факторов неопределенности для обеспечения устойчивого развития транспортной отрасли Российской Федерации» (шифр научной темы FZNW-2025-0023).

The article was prepared within the research project funded by the Federal budget (funding source: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation) on the theme: "Scientific, methodological, and practical foundations for the development and application of intelligent technologies and decision support systems considering uncertainty factors to ensure the sustainable development of the transport sector of the Russian Federation" (research theme code FZNW-2025-0023).

Список источников / References

1. Воробьев А. А., Каримов Д. Д., Сотников К. А., Богданов Н. В. Управление аэродинамическим взаимодействием высокоскоростного поезда с элементами искусственных сооружений тоннельного типа // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2024. № 1 (110). С. 62–68. EDN: ZYNJHE.

Vorobyev A. A., Karimov D. D., Sotnikov K. A., Bogdanov N. V. Management of aerodynamic interaction of high-speed train with elements of tunnel-type artificial structures. *Transport of the Russian Federation*. 2024;1(110):62–68. EDN: ZYNJHE. (In Russ.).

2. Ким К. К., Крон И. Р., Ватулин Я. С., Ватулина Е. Я. Разработка метода по уменьшению лобового аэродинамического сопротивления капсулы трубопроводного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16, № 2. С. 263–267. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-2-263-267>. EDN: OYZZHC.

Kim K. K., Kron I. R., Vatulin Ya. S., Vatulina E. Ya. The development of the method on the reduction of aerodynamic drag of the pipeline transport capsule. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2019;16(2):263–267. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-2-263-267>. EDN: OYZZHC. (In Russ.).

3. Novák J. Single train passing through a tunnel. *European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECCOMAS CFD 2006)*. Netherlands, 2006. 12 p.

4. Sterling M., Baker C. J., Jordon S. C., Johnson T. A study of the slipstreams of high-speed passenger trains and freight trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2008;222(2):177–193. <https://doi.org/10.1243/0954409-7jrrt133>.

5. Martinez A., Vega E., Gaite J., Meseguer J. Pressure measurements on real high-speed trains travelling through tunnels. *BBA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications*. Milano, 2008. 11 p.

6. Ледяев А. П., Кавказский В. Н., Креер Р. О. Особенности проектирования тоннелей на высокоскоростных магистралях // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 3–9. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2015-4-3-9>. EDN: TBIORT.

Ledyaev A. P., Kavkazskiy V. N., Kreer R. O. Specifics of tunnel design on high-speed lines. *Transport of the Urals*.

2015;4(47):3–9. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2015-4-3-9>. EDN: TBIORT. (In Russ.).

7. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. Москва: ДМК Пресс, 2015. 564 с. ISBN 978-5-97060-140-2.

Alyamovskiy A. A. SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii. Moscow, 2015. 564 p. ISBN 978-5-97060-140-2. (In Russ.).

8. Ледяев А. П., Кавказский В. Н., Шелгунов О. О. Математическое моделирование аэродинамических процессов в железнодорожных тоннелях на высокоскоростных магистралях // Метро и тоннели. 2021. № 3. С. 40–43. EDN: GCQUMA.

Lediaev A. P., Kavkazskiy V. N., Shelgunov O. O. Mathematical modeling of aerodynamic processes in railway tunnels on high-speed highways. *Metro i Tunneli*. 2021;3:40–43. EDN: GCQUMA. (In Russ.).

9. Алферова Е. Л., Лугин И. В., Кияница Л. А. Моделирование возмущений воздушного потока при движении поездов в двухпутном тоннеле метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 6. С. 5–14. EDN: WDZUHH.

Alferova E. L., Lugin I. V., Kiyantsa L. A. Simulation of airflow disturbances to movement of trains in double-track tunnel underground. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'*. 2016;6:5–14. EDN: WDZUHH. (In Russ.).

10. Каримов Д. Д. У. Управление аэроупругим взаимодействием подвижного состава с элементами искусственных сооружений тоннельного типа: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2023. 134 с. EDN: HJBFBN.

Karimov D. D. U. Upravleniye aerouprugim vzaimodeystviyem podvizhnogo sostava s elementami iskusstvennykh sooruzheniy tonnel'nogo tipa. Saint Petersburg, 2023. 134 p. EDN: HJBFBN. (In Russ.).

11. Воробьев А. А., Ватаев А. С., Ватулин Я. С. [и др.]. Оценка динамики движения высокоскоростного подвижного состава // Техник транспорта: образование и практика. 2024. Т. 5, № 4. С. 437–444. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2024.4.437-444>. EDN: SLVLDK.

Vorobyov A. A., Vataev A. S., Vatulin J. S. [et al.]. Evaluation of the dynamics of high-speed rolling stock. *Transport Technician: Education and Practice*. 2024;5(4):437–444. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2024.4.437-444>. EDN: SLVLDK. (In Russ.).

12. Khayrullina A., Blocken B., Janssen W., Straathof J. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015;139:100–110. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.019>.

13. Полякова Е. Я. Особенности аэродинамики подвагонного пространства высокоскоростного подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2021. 150 с.

Polyakova E. Ya. Osobennosti aerodinamiki podvagonnogo prostranstva vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava. Saint Petersburg, 2021. 150 p. (In Russ.).

14. Сладкова Л. А., Неклюдов А. Н. Динамика подвижного состава и выбор параметров гасителей колебаний // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 4 (95). С. 13–20. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-2>. EDN: JYOTRB.

Sladkova L. A., Neklyudov A. N. Dynamics of the Rolling Stock and the Choice of Parameters of Vibration Dampers. *World of Transport and Transportation*. 2021;19(4):13–20. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-2>. EDN: JYOTRB. (In Russ.).

15. Mengge Yu., Rongchao J., Qian Z. [et al.]. Crosswind Stability Evaluation of High-Speed Train Using Different Wind Models. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2019;32:40. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0353-7>.

16. Baker C. J. Keynote lecture — The flow around high speed trains. *Proceedings of the BBA VI Conference*. Milano, 2008. P. 34.

17. Baker C. The flow around high speed trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2010;98(6):277–298. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.11.002>.

18. Воробьев А. А., Ватулин Я. С., Ватаев А. С. [и др.]. Управление аэроупругим взаимодействием подвижного состава с элементами транспортной инфраструктуры: монография. Казань: ООО «Бук», 2025. 138 с. ISBN 978-5-00254-143-0. EDN: JNVEHB.

Vorob'yev A. A., Vatulyn Ya. S., Vataev A. S. [et al.]. *Upravleniye aerouprugim vzaimodeystviyem podvizhnogo sostava s elementami transportnoy infrastruktury*. Kazan, 2025. 138 p. ISBN 978-5-00254-143-0. EDN: JNVEHB. (In Russ.).

Вклад авторов:

А. А. Воробьев. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, разработка и адаптация расчетных формул.

А. В. Терентьев. Развернутый обзор отечественных и зарубежных источников, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами.

О. Д. Покровская. Развернутый обзор отечественных и зарубежных источников, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами.

А. А. Степанов. Обобщение и анализ результатов моделирования, формулирование выводов по проведенному исследованию.

А. В. Курбатова. Обобщение и анализ результатов моделирования, формулирование выводов по проведенному исследованию.

Authors' contribution:

Alexander A. Vorobyov. Setting research goal and objectives, development and adaptation of calculation formulae.

Alexey V. Terentyev. Detailed reviewing of domestic and foreign sources, identification of shortcomings of existing methods, comparison with alternative approaches.

Oksana D. Pokrovskaya. Detailed reviewing of domestic and foreign sources, identification of shortcomings of existing methods, comparison with alternative approaches.

Alexey A. Stepanov. Generalization and analysis of modeling results, formulation of conclusions on the conducted research.

Anna V. Kurbatova. Generalization and analysis of modeling results, formulation of conclusions on the conducted research.

Информация об авторах:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 2244-1699

AuthorID (РИНЦ): 290846

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6319-4701>

AuthorID (SCOPUS): 55786353400

e-mail: 79219751198@yandex.ru

ТЕРЕНТЬЕВ Алексей Вячеславович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Логистика и транспортно-технологические системы» Государственного университета управления, г. Москва.

SPIN-код: 6676-4524

AuthorID (РИНЦ): 895055

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3500-2201>

AuthorID (SCOPUS): 57190408096

e-mail: aleksej.terentev.67@bk.ru

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Логистика и транспортно-технологические системы» Государственного университета управления, г. Москва.

SPIN-код: 8252-2587

AuthorID (РИНЦ): 592347

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9793-0666>

AuthorID (SCOPUS): 57204690735

ResearcherID: D-9930-2018

e-mail: insight1986@inbox.ru

СТЕПАНОВ Алексей Алексеевич, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры «Логистика и транспортно-технологические системы» Государственного университета управления, г. Москва.

SPIN-код: 4525-2056

AuthorID (РИНЦ): 442970

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4385-2612>

AuthorID (SCOPUS): 57215420888

e-mail: salex128@yandex.ru

КУРБАТОВА Анна Владимировна, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры «Логистика и транспортно-технологические системы» Государственного университета управления, г. Москва.

SPIN-код: 6077-1613

AuthorID (РИНЦ): 532679

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0176-4817>

e-mail: kurbatova-guu@yandex.ru

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

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026; одобрена после рецензирования 15.06.2026; принята к публикации 03.07.2026.

Information about the authors:

VOROBYOV Alexander Alfeyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Land Transport and Technological Complexes Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg.

SPIN-code: 2244-1699

AuthorID (RSCI): 290846

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6319-4701>

AuthorID (SCOPUS): 55786353400

e-mail: 79219751198@yandex.ru

TERENTYEV Alexey Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Logistics and Transport Technology Systems Department, State University of Management, Moscow.

SPIN-code: 6676-4524

AuthorID (RSCI): 895055

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3500-2201>

AuthorID (SCOPUS): 57190408096

e-mail: aleksej.terentev.67@bk.ru

POKROVSKAYA Oksana Dmitrievna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor

of the Logistics and Transport Technology Systems Department, State University of Management, Moscow.
SPIN-code: 8252-2587

AuthorID (RSCI): 592347

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9793-0666>

AuthorID (SCOPUS): 57204690735

ResearcherID: D-9930-2018

e-mail: insight1986@inbox.ru

STEPANOV Alexey Alekseevich, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Logistics and Transport Technology Systems Department, State University of Management, Moscow.

SPIN-code: 4525-2056

AuthorID (RSCI): 442970

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4385-2612>

AuthorID (SCOPUS): 57215420888

e-mail: salex128@yandex.ru

KURBATOVA Anna Vladimirovna, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Logistics and

Transport Technology Systems Department, State University of Management, Moscow.

SPIN-code: 6077-1613

AuthorID (RSCI): 532679

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0176-4817>

e-mail: kurbatova-guu@yandex.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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 12.01.2026; approved after reviewing 15.06.2026; accepted for publication 03.07.2026.

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ И ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ НЕЖЕСТКИХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЩЕЛЕВЫХ ПАЗОВ

А. Ю. Попов, Е. В. Кривонос, Э. Р. Минибаев, В. Р. Аллагулов 

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

 vadim_allagul@mail.ru

В статье рассмотрена актуальная проблема обработки глубоких щелевых пазов, полостей малой ширины ≤ 3 мм в деталях аэрокосмического и энергетического машиностроения. Основное внимание уделено недостаточной жесткости и склонности к вибрациям удлиненных цельных твердосплавных фрез с соотношением длины к диаметру $L/D > 5$.

Вибрации приводят к ухудшению качества поверхности, повышенному износу режущих кромок, образованию биений и к поломке инструмента. Для решения этой проблемы проанализированы существующие подходы. Предложен новый способ увеличения жесткости, заключающийся в использовании поддерживающего люнета. Люнет служит дополнительной опорой для фрезы, значительно повышая её жесткость и демпфируя колебания. Приводятся результаты математического моделирования статической жесткости инструментальной системы. Одним из ключевых преимуществ нового подхода является его технологическая простота и возможность интеграции в существующие станки с числовым программным управлением без кардинальной модернизации оборудования.

В отличие от активных систем указанный метод не требует сложной электроники или программного обеспечения. Метод позволяет вести обработку глубоких и узких пазов даже при неблагоприятном соотношении их ширины к глубине, что прежде считалось труднореализуемой задачей. Возросшая жесткость системы, в свою очередь, положительно сказывается на износостойкости инструмента и дает возможность увеличить режимы резания, тем самым наращивая общую производительность. Наибольший потенциал метод раскрывает при работе с жаропрочными сплавами, где классическое фрезерование наталкивается на жесткие технологические ограничения.

Ключевые слова: малоразмерная фреза, нежесткий инструмент, щелевой паз, вибрации, жесткость, поддерживающая стойка

Для цитирования: Попов А. Ю., Кривонос Е. В., Минибаев Э. Р., Аллагулов В. Р. Способ повышения жесткости и виброустойчивости нежестких концевых фрез при обработке щелевых пазов. Омский научный вестник. 2026. № 3 (199). С. 16–22. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-16-22>. EDN: DFRAWD.



© Попов А. Ю., Кривонос Е. В., Минибаев Э. Р., Аллагулов В. Р., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHOD OF INCREASING THE RIGIDITY AND VIBRATION RESISTANCE OF NON-RIGID END MILLS IN PROCESSING SLOT GROOVES

A. Yu. Popov, E. V. Krivonos, E. R. Minibaev, V. R. Allagulov 

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

 vadim_allagul@mail.ru

The article addresses the pressing challenge of machining deep slot grooves and narrow cavities with widths of 3 mm or less in components used in aerospace and power engineering. Particular emphasis is placed on the insufficient rigidity and tendency to vibrate in elongated solid carbide end mills, especially when the length-to-diameter ratio $L/D > 5$.

These vibrations degrade surface quality, accelerate cutting edge wear, induce runout and often lead to tool failure. The authors analyse existing solutions and propose a new method to enhance tool rigidity: the use of a supporting steady rest (steady). This device acts as an additional support for the end mill, significantly increasing its stiffness and suppressing vibrations. The authors present results from mathematical modeling of the static rigidity of the tool system. One of the key advantages of this method is its technological simplicity and the ability to integrate it into existing CNC machines without major equipment overhaul.

Unlike active damping systems, the method does not require complex electronics or specialized software. It enables the machining of deep, narrow slots even under highly unfavorable width-to-depth ratios—a task previously considered technologically challenging. Moreover, increased rigidity improves tool life and allows for higher cutting parameters, boosting productivity.

This approach is particularly promising for machining parts made from heat-resistant alloys, where conventional milling techniques face significant limitations.

Keywords: small-diameter end mill, low-rigidity tool, narrow slot, vibrations, stiffness, supporting steady rest

For citation: Popov A. Yu., Krivonos E. V., Minibaev E. R., Allagulov V. R. Method of increasing the rigidity and vibration resistance of non-rigid end mills in processing slot grooves. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):16–22. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-16-22>. EDN: DFRAWD. (In Russ.).



© Popov A. Yu., Krivonos E. V., Minibaev E. R., Allagulov V. R., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

При изготовлении моноколёс для высокотемпературной части турбин применяются труднообрабатываемые порошковые материалы с более высокими механическими свойствами и менее технологичными. Конструкции моноколёс становятся менее технологичными — глубина пазов и кривизна лопаток увеличивается, ширина пазов уменьшается [1, 2]. Моноколёса из хрупких порошковых материалов разработчики не рекомендуют обрабатывать методами, связанными с эрозией или высокотемпературными воздействиями. Остаются традиционные методы обработки — лезвийным инструментом, в основном фрезами [3].

Основной технологической проблемой является низкая жесткость концевых фрез, приводящая к следующим негативным явлениям:

1. Изгиб под действием радиальной силы резания, вызывающий погрешность формы паза, такие как: конусность, бочкообразность и отклонение от прямолинейности [4, 5].

2. Автоколебания (вибрации), возникающие из-за малого демпфирования и динамической неустойчивости процесса, приводят к ускоренному износу, ухудшению качества поверхности и поломке инструмента [6, 7].

3. Термодеструкции из-за затрудненного отвода тепла из зоны резания.

Компенсировать эти факторы, до некоторой степени, можно за счёт оптимизации режимов резания, применения смазочно-охлаждающих жидкостей и виброгасящих оправок, но эти методы теряют эффективность при $L/D > 5$ [8]. Наиболее очевидный способ повышения жесткости инструмента — это изготовление специальных фрез с режущей части на небольшом участке торцевой части фрезы и цилиндрической или конической части остального стержня. К сожалению, применение фрез конической формы «морковки» не всегда возможно. Наиболее неблагоприятный вариант, когда приходится выполнять цилиндрический стержень с диаметром, как на режущей части.

Таким образом, внедрение дополнительной опоры представляет собой рациональное решение про-

блемы обработки глубоких узких пазов в труднообрабатываемых материалах. Метод сочетает в себе простоту реализации, высокую эффективность и технологическую гибкость. Он позволяет не только увеличить соотношение L/D , но и стабилизировать процесс резания, повысить качество поверхности и снизить себестоимость операции за счёт увеличения стойкости инструмента. В перспективе возможно развитие концепции с использованием самоцентрирующихся или адаптивных опор, реагирующих на изменение нагрузки в реальном времени.

Применение данного способа расширяет возможности технологических решений при изготовлении деталей сложной формы для авиакосмической и энергетической отраслей. Метод стоит взять на вооружение производствам, где высокоточное фрезерование приходится вести в тесных рамках, заданных конструкцией инструмента и спецификой обрабатываемого материала.

В рамках настоящей работы решаются две взаимосвязанные задачи: конструирование поддерживающего люнета, способного повысить жесткость концевой фрезы до уровня, эквивалентного отношению $L/D \leq 3$, и построение математической модели статической жесткости инструментальной системы, необходимой для расчета конструктивных параметров этого люнета.

Анализ существующих методов

В исследовании были проанализированы следующие методы:

1. Конструктивно-технологические: использование фрез с переменным шагом и неравномерным углом наклона зубьев, которые позволяют эффективно бороться с вибрациями [9], но кратно повышают стоимость инструмента и не решают проблему статического изгиба инструмента.

2. Оборудование: использование прецизионных шпинделей с активными системами демпфирования, которые также не решают проблему не жесткости инструмента.

3. Рациональные стратегии обработки: реверсивное фрезерование, трохоидальные стратегии,

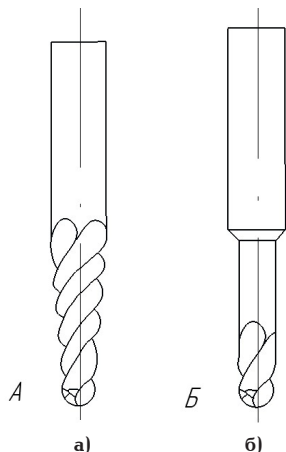


Рис. 1. Фрезы: а) коническая;
б) специальной геометрии
Fig. 1. Milling cutters: а) conical;
б) evaluation rating

Источник / Source: разработано
авторами / compiled by the authors

которые снижают радиальную силу, но увеличивают путь инструмента и время обработки [10].

Таким образом, актуальной задачей является разработка комплекса мер, обеспечивающих увеличение критической проблемы обработки моноколес — повышение жёсткости концевых фрез для обеспечения качественных показателей изделия.

Для работы с люнетом конструкция фрез должна быть изменена по сравнению с образцами, имеющимися на рынке. В основном предлагаются фрезы с конической режущей частью и сферической формой торцевой части (рис. 1а). Геометрия целевого паза изделия не позволила использовать такие фрезы. Возникла необходимость изготовления специальной конструкции фрезы цилиндрической формы, у которой стержень дополнительно занижен по сравнению с режущей частью на 0,05 мм (рис. 1б). Анализ стратегий обработки пазов лопаток моноколес конической и цилиндрической формы показывает, что практически весь припуск снимается сферическим торцом, а боковая поверхность редко используется. Коническая часть выполняет роль поддержки торцевой части и приближает форму фрезы к балке равного сопротивления. На цилиндрической части специальной фрезы делать винтовые канавки нецелесообразно, так как это снижает момент инерции сечения и увеличивает величину отгиба фрезы.

На торце специальной фрезы длина режущей части не превышает 3 диаметров только для выхода круга. В работе участвует только сферическая часть инструмента. Фреза выбрана двузубая. Это позволяет выполнять фаски и дополнительную доработку лезвия. Зона контакта фрезы и заготовки не превышала 1,5 мм в самом неблагоприятном месте траектории и не выходила на цилиндрическую часть фрезы. Контакт только по сфере в разных ее участках приводил к изменению равнодействующей силы по направлению и по величине. Наиболее неблагоприятное для деформации стержня

фрезы было перпендикулярное направление к оси инструмента. Именно этот вариант рассматривался в расчетной модели. Максимальная сила резания по расчетам не превышает 40 Н. Лезвие инструмента оказывает значительное влияние на процесс обработки. Параметр остроты лезвия ρ (условный радиус округления лезвия) связан с величиной подачи на зуб (0,15 мм/зуб). Он должен быть в пределах 0,1–0,2 от величины подачи, т. е. от 0,005 до 0,01 мм. Нормальное значение ρ — от 0,01 до 0,015 мкм. Лезвие дорабатывалось мелкозернистым инструментом. Для обработки хрупкого материала повышенной твердости (до 40 HRC) инструмент показал хороший результат при величине ρ от 0,004 до 0,006 мм.

Для повышения прочности лезвия и предотвращения сколов выполнялась отрицательная фаска — 20° по всей длине режущих кромок на сферической части режущей части. При величине ρ менее 0,004 мм стойкость инструмента становилась нестабильной. Это, очевидно, связано с неодинаковым сечением срезаемого слоя. 0, 15 мм — это максимальное сечение снимаемого слоя, среднее сечение не превышало 0,06 мм. По имеющейся в теории резания классификации, форма частиц соответствовала стружке надлома. В этом случае усадки стружки не происходит, и сечение стружки практически полностью соответствует сечению срезаемого слоя. Картина вполне соответствует опыту эксплуатации инструмента при обработке хрупких материалов, дающих стружку, которую можно отнести к «стружке надлома» [11]. Еще одна особенность инструмента, использованного в работе, — это зернистость сплава. Выбирали особо мелкозернистый сплав с размерами зерен менее 0,5 мкм. Он более устойчив к абразивному износу, который доминировал при обработке хрупкого порошкового сплава.

Предлагаемый способ поддержки инструмента

Предлагается способ поддержки инструмента, суть которого заключается в установке поддерживающего люнета, стойки которого поддерживают цилиндрическую часть фрезы и не позволяют ей совершать автоколебания (рис. 1).

Принцип действия: опорные стойки 6, установленные на минимальном технологическом расстоянии, создают дополнительную опору для фрезы 4,кратно увеличивая ее жесткость и подавляя поперечные колебания.

Материалы и методы исследования

Для проверки эффективности концепции люнетной поддержки было проведено конечно-элементное моделирование статического прогиба и модального анализа инструментальной системы в среде SOLIDWORKS Simulation 2024 [12, 13]. Выбор данной системы обусловлен её гибкостью и параметрическим моделированием, что позволяет быстро исследовать влияние геометрических параметров опоры на жесткость инструмента¹ [14].

Процедура моделирования включает следующие этапы:

1. Построение параметрической 3D-модели. В среде SOLIDWORKS была создана упрощенная,

¹ ГОСТ Р 57700.10 — 2018. Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области. Введ. 01 — 01 — 2019. Москва: Стандартинформ, 2018. 16 с.

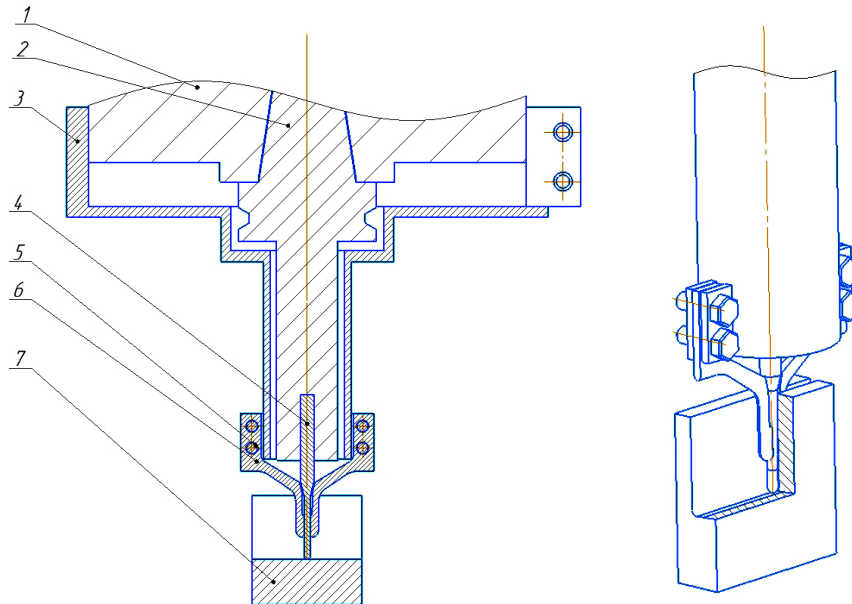


Рис. 2. Схема предлагаемого способа поддержки:
1 — шпиндель; 2 — оправка; 3 — корпус люнета; 4 — удлинённая малоразмерная фреза; 5 — крепёжные винты; 6 — поддерживающие стойки; 7 — заготовка с щелевым пазом

Fig. 2. Diagram of the proposed support method:
1 — spindle; 2 — mandrel; 3 — steady rest body; 4 — elongated small-sized cutter; 5 — fastening screws; 6 — supporting posts; 7 — workpiece with a slotted groove
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

но качественная для прочностного анализа модель цельной твердосплавной концевой фрезы диаметром 3 мм. Для учета реальных условий закрепления рабочий вылет составлял 30 мм.

2. Определение материалов и граничных условий:

— материал инструмента: выбран твердый сплав WC-Co (карбид вольфрама). Основные свойства: модуль упругости Юнга $E = 60000 \text{ Н/мм}^2$, плотность $\rho = 14500 \text{ кг/м}^3$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,22$;

— материал опорной стойки: выбрана бронза, так как она имеет низкий коэффициент трения и идеально подходит в качестве подшипника скольжения;

— граничное условие «Закреплено» было применено к цилиндрической поверхности хвостовика, что моделирует идеальное зажатие в цанговом патроне высокой точности (рис. 2а).

— условие для расчета статической жесткости: к сферической вершине инструмента приложена сила величиной, не превышающей 40 Н, направленная в противоположную сторону от направления подачи перпендикулярно оси инструмента (радиальная составляющая силы резания). Такое значение силы было выбрано исходя из опыта других исследователей [15]. В расчете учитывалась только радиальная составляющая силы резания, так как данная составляющая вызывает изгиб стержня фрезы. Это доминирующий фактор.

3. Обоснование расчетной схемы:

— вариант 1: базовый случай, без поддержки: анализ модели с вылетом 30 мм $L/D = 10$ только с указанными выше условиями;

— вариант 2: с одной поддерживающей стойкой, которая расположена на расстоянии 10 мм от вершины инструмента. Данное условие ограничивает перемещения узлов сетки в радиальном на-

правлении, имитируя контакт с неподвижной поддерживающей стойкой.

4. Для определения прогиба и напряжений построена сетка конечных элементов и при решении задачи использована автоматическая сетка из тетраэдральных элементов второго порядка, тип исследования — «Статика».

5. Постобработка и анализ результатов:

— для статического анализа были проанализированы изображения распределения статического прогиба и эквивалентных напряжений (рис. 3);

— оценивалось максимальное смещение на вершине фрезы.

Результаты моделирования и выводы:

1. По статической жесткости получены следующие результаты: в конфигурации без опоры максимальный прогиб достиг 0,112 мм, тогда как установка люнета уменьшила его до 0,038 мм. Таким образом, статическая жесткость системы выросла в 2,9 раза.

2. Анализ напряжений: во второй конфигурации, оснащенной опорой, пик эквивалентных напряжений переместился из области заделки инструмента в зону его контакта с люнетом. При этом абсолютные значения напряжений остались кратно ниже предела прочности материала.

К преимуществам использованного подхода можно отнести наглядное представление результатов, прямую параметрическую связку с геометрической моделью и высокую скорость сравнительной оценки конкурирующих вариантов конструкции. Вместе с тем модель имеет ряд упрощений: она не охватывает нелинейные эффекты в зоне контакта, не учитывает демпфирование и податливость узла «шпиндель — патрон». По этой причине получаемые цифры следует трактовать как оценочно-сравнительные, что вполне достаточно для оценки эффективности предлагаемого способа поддержки.

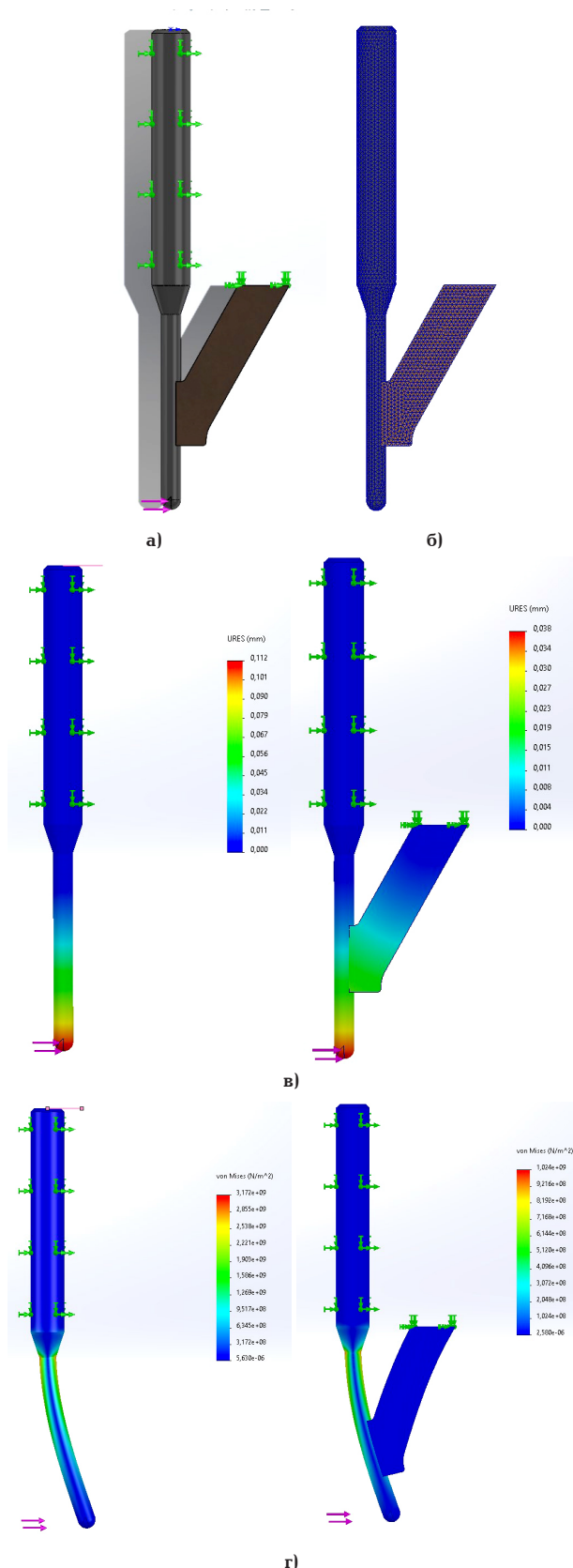


Рис. 3. Этапы конечно-элементного моделирования в SOLIDWORKS Simulation:

- а) граничные условия (закрепление и нагрузка);
 - б) локализованная сетка конечных элементов в зоне опоры;
 - в) результаты статического анализа — прогиб;
 - г) результат статического анализа — напряжения
- Fig. 3. Course-element modeling stages in SOLIDWORKS Simulation: a) boundary conditions (fixation and load); б) localized finite elements mesh in the support zone; в) static analysis results — deflection; г) static analysis result — stress

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

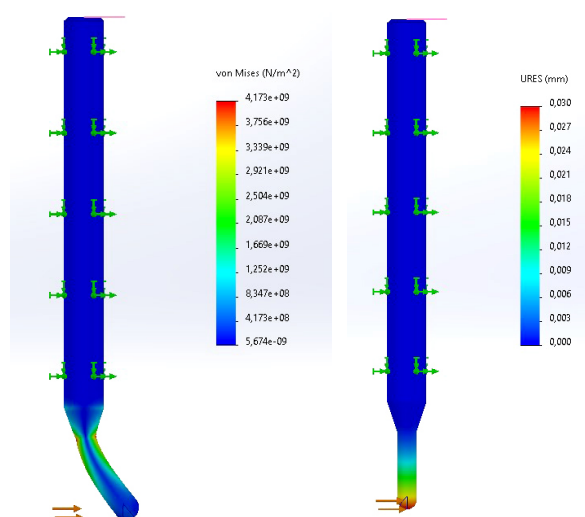


Рис. 4. Конечно-элементное моделирование для фрезы с вылетом $L/D = 3$

Fig. 4. Finite element modeling for milling cutters with the $L/D = 3$ span

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Проведенный в SOLIDWORKS Simulation численный эксперимент сыграл роль серьезного теоретического фундамента, предваряющего дорогостоящие натурные испытания, и дал возможность заблаговременно оптимизировать как геометрию опорных элементов, так и их расположение

На пятикратном координатном обрабатывающем центре OKUMA MU – 400VA был проведен ряд экспериментов по обработке щелевого паза при благоприятных условиях, а именно $L/D = 3$. Использовались фрезы фирмы ZCC – СТ диаметром 3 мм со сферическим торцом, количество режущих зубьев 2. Режимы обработки были следующие $A_p = 0,3$ мм, $N = 1500$ об/мин, $F = 0,05$ мм/зуб.

В ходе экспериментов выявлено, что при соотношении вылета инструмента к диаметру $L/D \leq 3$ подбор режимов резания и стратегии обработки позволяет увести систему из резонансной зоны. Это обстоятельство напрямую отразилось на качестве и точности получаемой поверхности.

На рис. 4 представлены результаты моделирования процесса резания в благоприятных условиях. Максимальная величина упругого отгиба инструмента составила 0,038 мм. Следовательно, дополнительная опора способна поднять жесткость фрезы с вылетом $L/D = 10$ до уровня, эквивалентного $L/D = 3$. Опираясь на такой запас жесткости, удалось подобрать рациональные режимы резания и выдержать допуск на обработку пера лопатки в пределах $\pm 0,025$ мм.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования показали, что установка дополнительной опоры уменьшила максимальный прогиб с 0,112 до 0,038 мм, что по уровню жесткости приближается к случаю, когда вылет фрезы ограничен соотношением $L/D = 3$. Анализ полученных данных свидетельствует, что определяющий фактор роста стойкости инструмента — подавление вибраций, благодаря чему снижаются ударные нагрузки и предотвращается преждевременное разрушение режущей кромки. Улучшение же качества поверхности и геометрической точно-

сти детали является прямым следствием возросшей жесткости инструментальной системы.

Недостатки и ограничения способа остаются:

— необходимость точной установки опор относительно оси шпинделя;

— сложность применения при обработке пазов с переменной глубиной и нелинейной формой. Необходимо расчет и моделирование формы опорных стоек люнета.

Выводы и заключение

Проведенный анализ проблемы низкой жесткости и предрасположенности к автоколебаниям, свойственных удлиненным малоразмерным фрезам с отношением $L/D > 3$, позволил предложить принципиально новый метод их стабилизации, основанный на применении специального поддерживающего люнета.

Для верификации предложенной концепции было выполнено параметрическое конечно-элементное моделирование в программной среде SOLIDWORKS Simulation, включавшее статический анализ. Объектом исследования служила фреза диаметром 3 мм с вылетом 30 мм, что соответствует отношению $L/D = 10$. Моделирование с имитацией люнетной опоры дало следующие ключевые результаты:

— статическая жесткость: максимальный статический прогиб под действием радиальной силы 100 Н снизился с 0,112 (базовый случай) до 0,038 мм, что свидетельствует об увеличении жесткости в 2,9 раза;

— распределение напряжений: введение опоры привело к смещению пика эквивалентных напряжений из области заделки хвостовика в зону контакта стержня фрезы с опорными элементами люнета; при этом абсолютные значения напряжений не вышли за границы безопасного диапазона для твердосплавного инструментального материала группы WC-Co.

Результаты математического моделирования доказывают физическую состоятельность и высокий потенциал предлагаемого способа. Они количественно подтверждают, что даже одна дополнительная опора, расположенная вблизи свободного конца инструмента, способна кардинально улучшить его статические и динамические характеристики, теоретически позволяя расширить диапазон рабочих отношений L/D до 10 при сохранении требуемой жесткости конструкции.

Таким образом, на основе проведенного ряда экспериментов и конечно-элементного моделирования предложенный способ поддержки может быть рекомендован как эффективное техническое решение для повышения производительности и точности обработки при фрезеровании глубоких щелевых пазов малого сечения.

Список источников / References

- Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511843723>.
- Denkena B., Bergmann B., Teige C. Frictionally damped tool holder for long projection cutting tools. *Production Engineering*. 2018;6(12):715–722. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0847-7>. EDN: DQWRMX.
- Постнов В. В., Малахов Е. Н., Старовойтов С. В. [и др.]. Расчетно-экспериментальный метод компенсации погрешно-

сти механообработки лопаток газотурбинных двигателей на мехатронном станочном оборудовании // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 7 (52). С. 145–153. EDN: PWZUHP.

Postnov V. V., Malakhov E. N., Starovoitov S. V. [et al.]. Computational and experimental method of machining blades for gas turbine engines on mechatronic machines with error compensation. *Vestnik UGATU*. 2012;7(52):145–153. EDN: PWZUHP. (In Russ.).

4. Трусов В. Н., Скуратов Д. А., Законов О. И. [и др.]. Влияние режимов резания на температуру при фрезеровании заготовок из труднообрабатываемых материалов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2011. Т. 15, № 3 (43). С. 85–91. EDN: OWXVSV.

Trusov V. N., Skuratov D. A., Zakonov O. I. [et al.]. Calculation of cutting temperature at milling of purveyances from hard-processing materials. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2011;3(43):85–91. EDN: OWXVSV. (In Russ.).

5. Кочина Т. Б. Износ керамических инструментальных материалов при высокоскоростном резании жаропрочных никелевых сплавов // Металлообработка. 2013. № 2. С. 7–13. EDN: REKXIR.

Kothina T. B. Wear of ceramic tool materials in the high-speed cutting of refractory nickel alloys. *Metalworking*. 2013;2:7–13. EDN: REKXIR. (In Russ.).

6. Smith S., Tlustý J. Current trends in high-speed machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1997;119(4B):664–666. <https://doi.org/10.1115/1.2836806>.

7. Munoa J., Beudaert X., Dombóvari Z. [et al.]. Chatter suppression techniques in metal cutting. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*. 2016;65(2):785–808. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.004>. EDN: VJNJHW.

8. Schmidt J., Tritschler H. Micro Milling of Hardened Steel. *Microsystem Technologies*. 2004;10(3):167–174. <https://doi.org/10.1007/s00542-003-0346-3>. EDN: FMEKUB.

9. Bari P., Kilic Z. M., Law M. Rapid stability analysis of variable pitch and helix end mills using a non-iterative multi-frequency solution. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2023;13(237):2109–2118. <https://doi.org/10.1177/09544054221126967>. EDN: ONUWRR.

10. Pleša A., Nithyanand G., Akhavan Niaki F. [et al.]. Identification of optimal machining parameters in trochoidal milling of Inconel 718 for minimal force and tool wear and investigation of corresponding effects on machining affected zone depth. *Manufacturing Letters*. 2019;21:28–33. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.05.003>.

11. Ярославцев В. М. Особенности процессов стружкообразования и формирования поверхностного слоя детали при обработке газотермических покрытий // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2016. № 6. С. 18–29. <https://doi.org/10.7463/0616.0842354>. EDN: WISNIF.

Yaroslavtsev V. M. Osobennosti protsessov struzhko-obrazovaniya i formirovaniya poverkhnostnogo sloya detali pri obrabotke gazotermicheskikh pokrytiy. *Nauka i Obrazovaniye*. 2016;6:18–29. <https://doi.org/10.7463/0616.0842354>. EDN: WISNIF. (In Russ.).

12. Cook R. D., Malkus D. S., Plesha M. E., Witt R. J. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. 4th ed. John Wiley & Sons, 2001. 736 p. ISBN 978-0-471-35605-9.

13. Kivanç E. B., Budak E. Structural modeling of end mills for form error and stability analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004;11(44):1151–1161.

14. Wang Le., Yue C., Liu X. [et al.]. Conventional and micro scale finite element modeling for metal cutting process: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024;2(37):199–232. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.03.004>. EDN: PZBCKM.

15. Пономарев Б. Б., Нгуен Хьен Ши. Исследования динамики процесса пятикоординатного концевое фрезерования //

Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2019. Т. 4, № 7. С. 108–120. https://doi.org/10.34031/article_5d35d0b677dc74.96046396.

Ponomarev B., Hien Nguyen. Dynamics of five-axis end milling process. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After. V. G. Shukhov*. 2019;4(7);108–120. https://doi.org/10.34031/article_5d35d0b677dc74.96046396. (In Russ.).

Вклад авторов:

А. Ю. Попов. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, общее редактирование текста, формулировка выводов.

Е. В. Кривонос. Разработка методологии исследования.

Э. Р. Минибаев. Разработка конечно-элементного моделирования в SOLIDWORKS Simulation.

В. Р. Аллагулов. Развернутый обзор отечественных и зарубежных источников, разработка конструкции специального люнета.

Authors' contribution:

Andrey Yu. Popov. Setting research aim, objectives and scientific problem, general text editing, drawing conclusions.

Evgeniy V. Krivonos. Developing the research methodology.

Erik R. Minibaev. Developing the finite element modeling in SOLIDWORKS Simulation.

Vadim R. Allagulov. Detailed reviewing of domestic and foreign sources, the design of a special lunette.

Информация об авторах:

ПОПОВ Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металло-режущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 4871-2344

AuthorID (РИНЦ): 175664

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7703-9283>

AuthorID (SCOPUS): 25228115700

e-mail: popov_a_u@list.ru

КРИВОНОС Евгений Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металло-режущие станки и инструменты» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7238-5136

AuthorID (РИНЦ): 762266

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8485-1862>

AuthorID (SCOPUS): 57193400934

ResearcherID: ABC-7096-2020

e-mail: evgenii.krivonos@mail.ru

МИНИБАЕВ Эрик Ренатович, инженер учебного научно-производственного центра «Современные технологии машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6037-9513

AuthorID (РИНЦ): 1315196

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1539-053X>

e-mail: erikminibaev@yandex.ru

АЛЛАГУЛОВ Вадим Ришатович, инженер учебного научно-производственного центра «Современные технологии машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2714-3643

AuthorID (РИНЦ): 1263210

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5427-7337>

e-mail: vadim_allagul@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.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 09.12.2025; одобрена после рецензирования 23.12.2025; принята к публикации 31.07.2026.

Information about the authors:

POPOV Andrey Yur'yevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Metal-cutting Machines and Tools Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4871-2344

AuthorID (RSCI): 175664

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7703-9283>

AuthorID (SCOPUS): 25228115700

e-mail: popov_a_u@list.ru

KRIVONOS Evgeniy Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Metal-cutting Machines and Tools Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7238-5136

AuthorID (RSCI): 762266

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8485-1862>

AuthorID (SCOPUS): 57193400934

ResearcherID: ABC-7096-2020

e-mail: evgenii.krivonos@mail.ru

MINIBAEV Erik Renatovich, Engineer of the Educational, Scientific, and Production Center "Modern Mechanical Engineering Technologies", Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 6037-9513

AuthorID (RSCI): 1315196

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1539-053X>

e-mail: erikminibaev@yandex.ru

ALLAGULOV Vadim Rishatovich, Engineer of the Educational, Scientific, and Production Center "Modern Mechanical Engineering Technologies", Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 2714-3643

AuthorID (RSCI): 1263210

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5427-7337>

e-mail: vadim_allagul@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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 09.12.2025; approved after reviewing 23.12.2025; accepted for publication 31.07.2026.

ЛОКАЛЬНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПЛОСКИХ ТОЧЕЧНЫХ МНОЖЕСТВ

В. Ю. Юрков✉, М. А. Чижик, С. Н. Литунов, С. С. Дубова

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

✉ viktor_yurkov@mail.ru

Описывается метод и алгоритм локальной модификации конфигурации точечных нерегулярных множеств в евклидовой плоскости. Точечные нерегулярные множества можно рассматривать как множества вершин некоторой фигуры, в частности ломаной, являющейся характеристической или опорной фигурой для гладкой кусочно-нелинейной кривой. Числовые параметры (координаты узлов) характеристической ломаной могут меняться в заданных промежутках, изменяя тем самым форму ломаной. Локальная модификация оставляет постоянными такие указанные метрические параметры характеристической ломаной, как длины звеньев и суммарную длину ломаной.

Введено понятие параметрической локальной модификации ломаной. Параметризация локальной модификации зависит от числа переменных узлов. Для осуществления локальной модификации предложена иерархическая структуризация точечного множества, которая заключается в последовательном выделении точечных подмножеств, допускающих локальные модификации различного числа параметров.

Подробно описаны 0-, 1- и 2-параметрические модификации. Приводятся несколько примеров, иллюстрирующих описанный подход. Представлена локальная модификация кусочно-линейного сечения криволинейного отражателя лучистой энергии с целью перенаправления потока отраженных лучей. Локальная модификация реализована в светонаправляющей конструкции, в которой плоское сечение отражающей поверхности состоит из ломаной с фиксированными длинами звеньев. Дискретные модификации отражающей поверхности генерируют на приемнике ступенчатое распределение энергетической освещенности. Описывается один из возможных вариантов построения и модификации характеристической фигуры для составной кривой, моделирующей поперечное сечение поверхности свободно висящей ткани.

Ключевые слова: точечное множество, структуризация, геометрическая форма, характеристическая ломаная, параметризация, локальная модификация

Для цитирования: Юрков В. Ю., Чижик М. А., Литунов С. Н., Дубова С. С. Локальная модификация геометрической формы плоских точечных множеств. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 23–30. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-23-30>. EDN: SBAWKV.



© Юрков В. Ю., Чижик М. А., Литунов С. Н., Дубова С. С., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

LOCAL MODIFICATION OF THE GEOMETRIC SHAPE OF PLANAR POINT SETS

V. Yu. Yurkov✉, M. A. Chizhik, S. N. Litunov, S. S. Dubova

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

✉ viktor_yurkov@mail.ru

The article presents a local modification method and an algorithm of the irregular point sets configuration in the Euclidean plane. Irregular point set is a set of vertices of some planar figure, specifically it becomes a broken line. The figure can be a base-set for some smooth planar piece-nonlinear curve. Numerical parameters or coordinates of the base-set are variable by given intervals, as well as the shape of the base-set. The local modification does not modify such metrical parameters of the base-set as length of sections and total length of the broken line.

The authors introduce the concept of the admissible parametric local modification of the broken line. The admissible parametric local modification depends upon the number of variable points. In order to demonstrate the local modification the authors propose the hierarchic structuring of the base-set that means successive selection such sub-sets of adjacent points, which allow realizing the local modification of various number of parameters.

The 0-, 1- and 2-parametric modifications are described in detail. The article shows two examples in order to illustrate the method. The first example describes the local modification of piece-linear segments of non-linear energy rays reflector. The aim of the segments modification is to change the direction of reflected rays. Local modification is implemented in light-guiding structure, in which flat section of reflecting surface consists of broken with fixed lengths of links. Discrete modifications of reflecting surface generate stepped distribution of energy illumination at receiver. The other example presents one of possible realizations and modification of the base-set for some accidental shape of some surface transverse section. The transverse section is a composite curve that simulates the section of a freely hanging fabric.

Keywords: point set, structuring, geometric shape, base-set of the broken, parameterization, admissible local modification

For citation: Yurkov V. Yu., Chizhik M. A., Litunov S. N., Dubova S. S. Local modification of the geometric shape of planar point sets. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):23–30. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-23-30>. EDN: SBAWKV. (In Russ.).



© Yurkov V. Yu., Chizhik M. A., Litunov S. N., Dubova S. S., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Процесс конструирования составных кривых и поверхностей, удовлетворяющих тем или иным условиям формообразования, как правило, состоит из двух этапов. На первом этапе задается характеристический или опорный геометрический объект — плоская или пространственная ломаная, многогранная поверхность и т. п. Узлы, ребра и грани характеристического объекта служат для задания формы конструируемого объекта и для управления его формой. На втором этапе характеристический объект аппроксимируется (сглаживается) кусочно-нелинейной кривой или поверхностью с обеспечением заданных порядков гладкости в местах сшивки кусков [1, 2].

Управление формой конструируемого объекта заключается в изменении параметров узлов характеристической фигуры с целью максимально-го приближения получающихся законов изменения производных различных порядков к заданным [3–5].

Однако в процессе конструирования кривых и поверхностей существует еще одна проблема, связанная с поиском оптимальной формы самой характеристической фигуры. Например, физический объект, геометрическая форма которого теоретически соответствует конструируемому гладкому кусочно-нелинейному образу, практически может иметь отклонения от заданной формы, обнаруживаемые после контрольных измерений. В этом случае может возникнуть необходимость внесения корректирующих изменений в математическую модель объекта. Такие изменения можно назвать локальной модификацией. Применительно к характеристической фигуре локальная модификация означает изменение метрических параметров его узлов и других элементов [6].

Проблема локальной модификации возникает в случае, когда процесс конструирования ограничивается первым этапом и конструируемый объект сам представляет собой конечно-элементную форму, в частности состоящую из линейных конечных элементов — треугольников или многоугольников.

Теоретически такой объект будет соответствовать математической модели, но практически, в результате эксплуатации и различных внешних воздействий, его форма может иметь отклонения от расчетной. Следовательно, возникает необходимость локальной модификации формы [7].

В данной работе рассматривается локальная модификация характеристической фигуры, сохраняющая постоянными значения метрических характеристик этой фигуры, а также некоторые возможные применения локальной модификации.

Общая постановка задачи

Пусть на плоскости задано множество точек A_i , $i = 0, \dots, n$. Будем называть такое множество **ортогонально упорядоченным**, если на плоскости найдется хотя бы одна прямая, на которую это множество проецируется ортогонально так, что проекции точек образуют упорядоченную последовательность. Эту прямую можно принять за ось абсцисс правой системы координат Ox , точку A_0 — за начало координат, а проекции остальных точек — за узлы расположенной на оси абсцисс сетки $0 = x_0 < x_1 < \dots < x_n$. Каждая точка множества будет определена в полученной системе координат, а ломаная $A_0(x_0, y_0) \dots A_1(x_1, y_1) \dots A_n(x_n, y_n)$ взаимно однозначно отобразится на отрезок $[x_0, x_n]$ оси Ox . В частном случае множество точек может быть равномерно упорядоченным, если сетка будет равномерной.

Множество точек будем называть **полярно упорядоченным**, если на плоскости найдется хотя бы одна окружность, на которую каждая точка проецируется ортогонально так, что проекции точек образуют на окружности упорядоченную последовательность. Принимая центр окружности за полюс, получим определение каждой точки в полярной системе координат и взаимно однозначное соответствие между точками ломаной и точками дуги окружности.

Предположим, что каждая точка множества имеет возможность изменять свое положение вдоль некоторой заданной кривой или в некоторой зам-

кнутой области. Допустимыми положениями точек назовем такие их положения, при которых остаются постоянными какие-либо метрические характеристики конфигурации множества. К метрическим характеристикам можно отнести следующие:

- суммарная длина звеньев ломаной при изменении длин отдельных звеньев;
- длина каждого звена ломаной;
- площадь, ограниченная осью абсцисс, ломаной и последней проецирующей прямой;
- площадь, ограниченную ломаной и прямыми, соединяющими полюс с крайними точками ломаной;
- интервал изменения углов между соседними звеньями ломаной;
- комбинацию этих характеристик и др.

В данной работе мы будем учитывать первую и вторую из перечисленных метрических характеристик. Кроме этого, можно задать еще одно условие, упрощающее задачу. Пусть никакие допустимые изменения положений точек не меняют первоначально полученную сетку на оси абсцисс. В этом случае допустимые изменения положений точек будут определены прямыми $x = x_i$ в декартовой системе координат и $\varphi = \varphi_i$ в полярной системе координат. Меняться будут только ординаты и полярные радиусы.

Зафиксируем положение двух точек A_i и A_j , $i < j$, $0 \leq i \leq n-1$, $1 \leq j \leq n$. Изменение положений точек $A_{i+1}, \dots, A_{j-1}$ при фиксированных положениях A_i и A_j назовем **допустимой локальной $(j-i-2)$ -параметрической модификацией** конфигурации последовательных $j-i+1$ точек. Задача заключается в том, чтобы, применяя допустимую локальную модификацию, изменить конфигурацию множества точек, сохраняя заданную метрическую характеристику, а именно — суммарную длину звеньев ломаной или длину каждого звена.

Условие постоянства длины ломаной

Предположим, что длина ломаной $A_i \dots A_j$ и сетка на оси абсцисс остаются постоянными. Обозначим длину $L_{ij} > |A_i A_j|$. Длины звеньев могут меняться. Тогда для любого значения $i < k < j$ промежутков изменения ординаты y_k точки A_k будет ограничен: $y_k^{\min} \leq y_k \leq y_k^{\max}$. Здесь минимальная и максимальная ординаты есть ординаты точек пересечения прямой $x = x_k$ с эллипсом $(A_i A_j L_{ij})$, где A_i и A_j — фокусы, а L_{ij} — фокусное расстояние. В случае полярно упорядоченного множества промежуток изменения радиуса r_k будет ограничен минимальным и максимальным радиусом. Эти радиусы определяются точками пересечения прямой $\varphi = \varphi_k$ с эллипсом.

Задав значение $y_{k'}$, получим два эллипса $(A_i A_k L_{ik})$ и $(A_k A_j L_{kj})$. Здесь $L_{ik} = L_{ij} - |A_i A_k|$, $L_{kj} = L_{ij} - |A_k A_j|$. Для любого значения $i < p < k$ получим изменение ординаты y_p точки A_p : $y_p^{\min} \leq y_p \leq y_p^{\max}$. Аналогично для любого значения $k < q < j$: $y_q^{\min} \leq y_q \leq y_q^{\max}$. И так далее до тех пор, пока не останется конечное число точек с неопределенным положением. Эти оставшиеся точки будут иметь только по два фиксированных положения с минимальной и максимальной ординатой.

Пусть длины звеньев остаются постоянными. Тогда систему координат можно выбрать так, чтобы начало координат находилось в точке $A_0(0, 0)$, а точка A_n имела координаты $(x_n, 0)$. В этом случае сетка на оси абсцисс не будет постоянной. Для любого значения $0 < i < n$ координаты точки A_i могут меняться в области

$$\begin{cases} x^2 + y^2 \leq (l_1 + \dots + l_i)^2 \\ (x - x_n)^2 + y^2 \leq (L_{on} - (l_1 + \dots + l_i))^2 \end{cases}$$

Задав точку $A_i(x_i, y_i)$, получим возможность выбора точек $A_j(x_j, y_j)$ и $A_k(x_k, y_k)$, $j < i$, $k > i$, координаты которых могут изменяться в пределах

$$\begin{cases} x^2 + y^2 \leq (l_1 + \dots + l_i)^2 \\ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq (L_{oi} - (l_1 + \dots + l_j))^2, \end{cases}$$

$$\begin{cases} (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq (l_{i+1} + \dots + l_k)^2 \\ (x - x_n)^2 + y^2 \leq (L_{in} - (l_{i+1} + \dots + l_k))^2 \end{cases}$$

и так далее.

Иерархическое структурирование множества точек

Разобьем исходное множество точек на подмножества

$$\begin{aligned} & \{A_0, \dots, A_n\} = \\ & = \{A_0, \dots, A_i\} \cup \{A_i, \dots, A_j\} \cup \dots \cup \{A_k, \dots, A_n\}, \end{aligned}$$

$$(i+1) + (j-i) + \dots + (n-k) = n+1.$$

Мощность каждого подмножества должна быть не меньше трех. Для подмножества их общих точек (узлов первого разбиения) $\{A_0, A_i, A_j, \dots, A_k, A_n\}$ можно определить допустимую локальную модификацию. При этом все остальные точки будут фиксированными относительно своего локального базиса. Например, точки $A_1, A_2, \dots, A_{i-1}$ будут фиксированными относительно точек A_0 и A_i .

Исключив из рассмотрения подмножества мощности 3, для которых возможна только локальная 0-параметрическая модификация, каждое оставшееся подмножество снова разобьем на подмножества мощности не меньше трех. При этом все остальные точки опять будут фиксированными относительно своего локального базиса. Точки, общие для смежных подмножеств, во втором разбиении снова образуют подмножество, для которого можно определить допустимую локальную модификацию соответствующей параметризации. Этот процесс продолжается до тех пор, пока исходное множество точек не будет разбито на смежные подмножества, мощности которых равны 3, 4 и 5. К этим подмножествам можно применять допустимые локальные 0-, 1- и 2-параметрические модификации соответственно.

Каждая допустимая локальная модификация реализуется в своей локальной системе координат. Так, первое разбиение исходного множества и первая локальная модификация реализуются в системе координат $Ox y$, где ось Ox направлена по прямой $A_0 A_n$. Вторая локальная модификация реализуется в системах координат $O_i x_i y_i$, $O_j x_j y_j$, ..., $O_k x_k y_k$, где $O_i = A_0$, $O_i x_i = A_0 A_i$, $O_j = A_i$, $O_j x_j = A_i A_j$, ..., $O_k = A_k$, $O_k x_k = A_k A_n$ (рис. 1).

Локальная 0-параметрическая модификация

Выберем на оси Ox три последовательных узла сетки и, соответственно, три точки A_i, A_{i+1}, A_{i+2} ломаной. Два выделенных этим выбором звена ломаной имеют длины $l_{i+1} = |A_i A_{i+1}|$, $l_{i+2} = |A_{i+1} A_{i+2}|$. Примем точки A_i и A_{i+2} за фокусы эллипса с фокусным расстоянием $L_{i+1, i+2} = l_{i+1} + l_{i+2}$. Зададим систему прямоугольных координат $O'x'y'$, где O' — середина

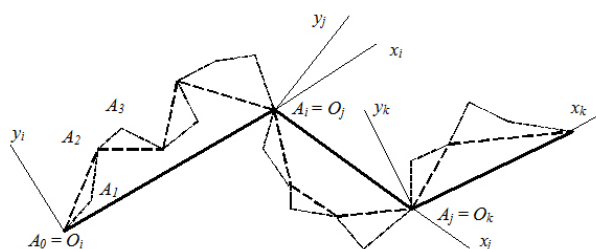


Рис. 1. Схема локальной модификации формы
Fig. 1. Scheme of the local shape modification

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

отрезка AA_{i+2} , ось $O'x'$ совпадает с прямой AA_{i+2} . В системе $O'x'y'$ уравнение эллипса:

$$\begin{aligned} & (L_{i+1,i+2}^2 + |A_i A_{i+2}|^2) x'^2 + L_{i+1,i+2}^2 y'^2 = \\ & = \frac{1}{4} \cdot L_{i+1,i+2}^2 (L_{i+1,i+2}^2 - |A_i A_{i+2}|^2). \end{aligned}$$

Применив преобразование координат $O'x'y' \rightarrow Oxy$, получим уравнение эллипса в общем виде. Подставляя в него значение x_{i+1} и решая квадратное уравнение, получим второе значение ординаты точки A_{i+1} . Следовательно, три последовательные точки ломаной могут иметь только две возможные конфигурации, и 0-параметрическая модификация состоит из выбора одного из двух возможных положений.

Локальная однопараметрическая модификация

Пусть сумма длин звеньев ломаной будет $L = k|A_0 A_n|$, $k > 1$. Выберем четыре последовательных узла сетки $x_i, \dots, x_{i+3}$ и, соответственно, три звена ломаной. Пусть их суммарная длина $L_{i+1,i+3} > |A_i A_{i+3}|$. Изменение положений точек A_{i+1} и A_{i+2} при фиксированных положениях A_i и A_{i+3} назовем **допустимой локальной однопараметрической модификацией** конфигурации четырех последовательных точек. Очевидно, что при заданной длине $L_{i+1,i+3}$ значение ординат точек A_{i+1} и A_{i+2} будут ограничены значениями $y_{i+1}^{\min}, y_{i+1}^{\max}, y_{i+2}^{\min}, y_{i+2}^{\max}$. Точка A_{i+1} и точка A_{i+2} играют одинаковую роль в допустимой локальной модификации конфигурации: каждому допустимому положению точки A_{i+1} соответствует два положения точки A_{i+2} и наоборот. То есть между множествами точек A_{i+1} и точек A_{i+2} существует (2, 2)-соответствие.

Величины $y_{i+1}^{\min}, y_{i+1}^{\max}, y_{i+2}^{\min}, y_{i+2}^{\max}$ легко найти, если принять точки A_i и A_{i+3} за фокусы эллипса с фокусным расстоянием $L_{i+1,i+3}$ (рис. 2). Тогда в системе координат $O'x'y'$, опуская элементарные выкладки, получим уравнение эллипса:

$$\begin{aligned} & (L_{i+1,i+3}^2 + |A_i A_{i+3}|^2) x'^2 + L_{i+1,i+3}^2 y'^2 = \\ & = \frac{1}{4} \cdot L_{i+1,i+3}^2 (L_{i+1,i+3}^2 - |A_i A_{i+3}|^2). \end{aligned}$$

Применив преобразование координат $O'x'y' \rightarrow Oxy$, получим уравнение эллипса в общем виде. Подставляя в него значение x_{i+1} и x_{i+2} и решая квадратные уравнения, получим искомые величины.

Переход к пространству параметров выполним следующим образом. Найдем точки пересечения прямой AA_{i+3} с прямыми $x = x_{i+1}$ и $x = x_{i+2}$. Присвоим им значения параметров $u = v = 0$. Точкам

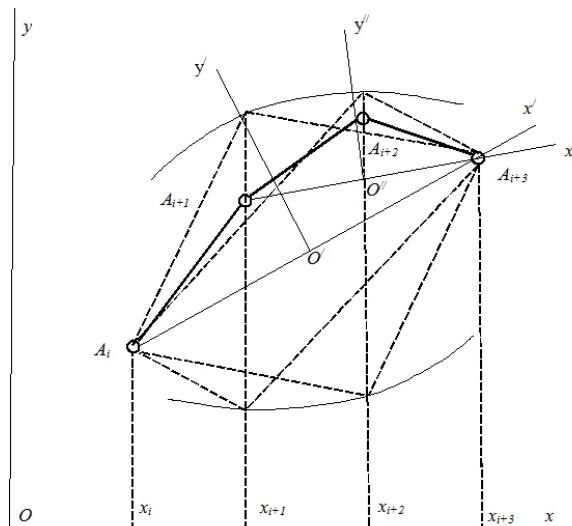


Рис. 2. Схема однопараметрической локальной модификации

Fig. 2. Scheme of the one-parametric local modification

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

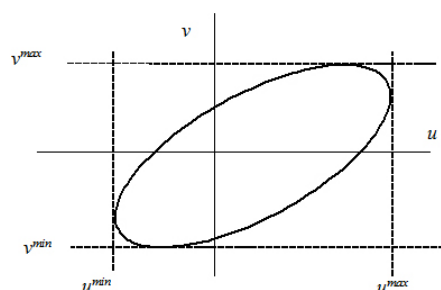


Рис. 3. Взаимная зависимость параметров для однопараметрической модификации
Fig. 3. Mutual dependence of parameters for the one-parametric modification

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

$y_{i+1}^{\min}, y_{i+1}^{\max}, y_{i+2}^{\min}, y_{i+2}^{\max}$ присвоим значения $u = -1, u = 1, v = -1, v = 1$ соответственно. Переходя к пространству параметров, получим прямоугольную область допустимых значений (рис. 3). В случае равномерной сетки область будет квадратной. Это следует из центральной симметрии с центром O' .

Чтобы найти зависимость $f(u, v) = 0$, сглаживающую возможные погрешности вычислений, можно поступить аналогично. Можно зафиксировать параметр u , принять точки A_{i+1} и A_{i+3} за фокусы, а длину $L_{i+2,i+3}$ — за фокусное расстояние и найти уравнение эллипса в системе $O'x''y''$. Применяя к полученному уравнению преобразование $O'x''y'' \rightarrow Oxy$, получим уравнение эллипса в общем виде. Подставляя значение x_{i+2} и решая квадратное уравнение, получим два значения параметра v . Пролодав эту процедуру достаточное количество раз, получим множество точек (u, v) зависимости $f(u, v) = 0$. Чтобы получить её в аналитической форме, можно применить метод наименьших квадратов (МНК) к уравнению кривой 2-го порядка.

Локальная двухпараметрическая модификация

Выберем пять последовательных узлов сетки и, соответственно, четыре последовательных звена ломаной. Точки A_i и A_{i+4} считаем фиксированными,

а промежуточные точки могут менять положение на прямых $x = x_{i+1}$, $x = x_{i+2}$, $x = x_{i+3}$ так, что суммарная длина звеньев ломаной остается постоянной. Любое изменение положений точек A_{i+1} , A_{i+2} , A_{i+3} при фиксированных A_i и A_{i+4} назовем **допустимой локальной двухпараметрической модификацией** конфигурации пяти последовательных точек.

Принимая длину ломаной $L_{i+1, i+4}$ за фокусное расстояние, а точки A_i и A_{i+4} — за фокусы эллипса, построим эллипс в системе координат $O'x'y'$, где начало координат располагается в середине отрезка $A_i A_{i+4}$, а ось абсцисс совпадает с прямой $A_i A_{i+4}$. Точки пересечения эллипса с прямыми $x = x_{i+1}$, $x = x_{i+2}$, $x = x_{i+3}$ дадут значения максимальных и минимальных ординат точек A_{i+1} , A_{i+2} , A_{i+3} . Примем точки пересечения прямой $A_i A_{i+4}$ с прямыми $x = x_{i+1}$, $x = x_{i+2}$, $x = x_{i+3}$ за точки в пространстве параметров $u = 0$, $v = 0$, $w = 0$. Минимальные и максимальные значения ординат промежуточных точек примем за $u = -1$, $u = 1$, $v = -1$, $v = 1$, $w = -1$, $w = 1$ соответственно. В пространстве параметров будет выделен параллелепипед, ограничивающий область допустимых параметров. Двухпараметрическое множество допустимых параметров представляет собой эллипсоид, вписанный в этот параллелепипед. Уравнение эллипсоида можно найти, вычислив достаточное количество точек (u , v , w) и применив МНК к общему уравнению квадратики в пространстве параметров.

Случай постоянства длин звеньев

Пусть при любых изменениях положений точек расстояния между соседними точками являются постоянными, равными первоначально заданным. Выберем четыре точки A_i , A_{i+1} , A_{i+2} , A_{i+3} . Возможна локальная однопараметрическая модификация конфигурации. Допустимые положения точек A_{i+1} , A_{i+2} при фиксированных A_i , A_{i+3} определяются системами неравенств:

$$\begin{cases} (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq (l_{i+1} + l_{i+2})^2 \\ (x - x_{i+3})^2 + (y - y_{i+3})^2 = l_{i+3}^2 \\ (x_{i+2} - x_{i+1})^2 + (y_{i+2} - y_{i+1})^2 = l_{i+2}^2 \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} (x - x_{i+3})^2 + (y - y_{i+3})^2 \leq (l_{i+2} + l_{i+3})^2 \\ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = l_{i+1}^2 \\ (x_{i+2} - x_{i+1})^2 + (y_{i+2} - y_{i+1})^2 = l_{i+2}^2 \end{cases}$$

При этом всегда $|A_i A_{i+3}| < l_{i+1} + l_{i+2} + l_{i+3}$.

Выберем пять точек A_i , A_{i+1} , A_{i+2} , A_{i+3} , A_{i+4} . Возможна локальная двухпараметрическая модификация конфигурации. Допустимые положения точки A_{i+1} :

$$\begin{cases} (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = l_{i+1}^2 \\ (x - x_{i+4})^2 + (y - y_{i+4})^2 \leq (l_{i+2} + l_{i+3} + l_{i+4})^2; \end{cases}$$

точки A_{i+3} :

$$\begin{cases} (x - x_{i+4})^2 + (y - y_{i+4})^2 = l_{i+4}^2 \\ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq (l_{i+1} + l_{i+2} + l_{i+3})^2; \end{cases}$$

точки A_{i+2} :

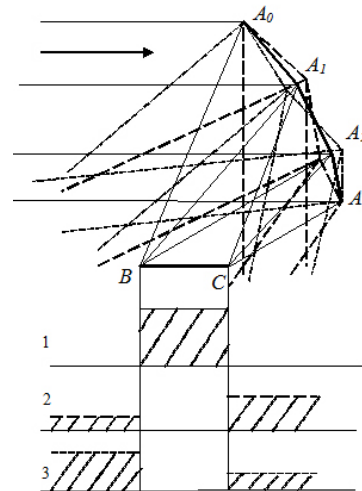


Рис. 4. Схема дискретной однопараметрической локальной модификации фрагмента кусочно-линейного зеркального отражателя и схематичный график энергетической освещенности

Fig. 4. Scheme of the discrete one-parametric local modification for the fragment of the piece-linear mirror reflector and the diagram of energy illumination

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

$$\begin{cases} (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq (l_{i+1} + l_{i+2})^2 \\ (x - x_{i+4})^2 + (y - y_{i+4})^2 = (l_{i+3} + l_{i+4})^2 \\ (x_{i+3} - x_{i+1})^2 + (y_{i+3} - y_{i+1})^2 = (l_{i+2} + l_{i+3})^2. \end{cases}$$

Некоторые приложения локальной модификации

Опишем кратко два возможных приложения локальной модификации множества точек.

В первом приложении ломаная, построенная на заданном множестве точек, является непосредственной геометрической моделью физического объекта. Во втором — множество точек определяет ломаную, которая является характеристической (опорной) ломаной для кусочно-нелинейной гладкой кривой, моделирующей форму сечения свободной висающей неупругой ткани.

В этом случае можно поставить две задачи. Первую, неоднозначность решения которой очевидна, можно сформулировать как поиск оптимальной конфигурации узлов характеристической ломаной с целью получения наиболее простой гладкой аппроксимации формы. Вторую задачу можно обозначить, если рассматривать данную геометрическую форму как случайную реализацию из некоторого множества структурно однородных форм, отличающихся друг от друга значениями числовых параметров.

На рис. 4 изображен трехэлементный фрагмент светонаправляющей конструкции, состоящей из ломаной $A_0 A_1 A_2 A_3$ с фиксированными длинами звеньев и отрезка BC . Ломаная моделирует часть нормального сечения кусочно-линейного призматического отражателя лучистой энергии [8, 9]. Отрезок BC представляет элемент плоского приемника энергии. Исходная форма отражателя изображена толстой линией. При падении на отражатель лучи-

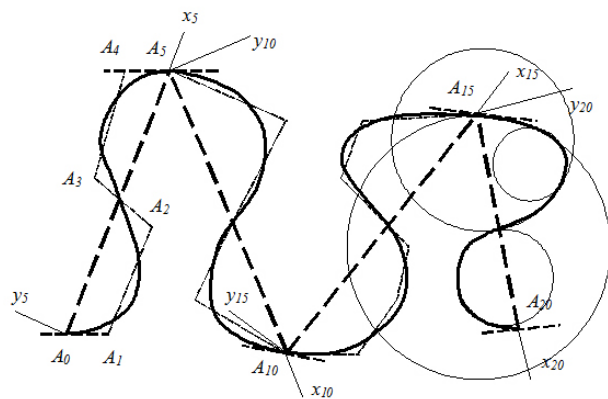


Рис. 5. Некоторые варианты структуризации и модификации характеристических ломаных для аппроксимации нестабильной формы

Fig. 5. Some variants of structuring and modification of characteristic broken lines for the unstable shape approximation

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

стой энергии (направление показано стрелкой) отраженные лучи от всех трех элементов направляют-ся на приемник BC .

Однопараметрическая модификация формы фрагмента может быть непрерывной и дискретной. Дискретные модификации показаны толстой и тонкой штриховыми линиями. На приемнике генерируется ступенчатое распределение энергетической освещенности. В исходном положении 1 лучи, отраженные от всех элементов, падают на приемник. В положении 2 модифицированной формы лучи, отраженные от элементов A_0A_1 и A_2A_3 , проходят правее элемента BC приемника, а отраженные от элемента A_1A_2 — левее. Элемент BC не получает энергии. В положении 3 модифицированной формы лучи, отраженные от A_0A_1 и A_2A_3 , проходят левее, а отраженные от A_1A_2 — правее элемента BC .

На рис. 5 показан фрагмент поперечного сечения поверхности, пространственная форма которой имеет мягкие подвижные складки. Такая поверхность образуется свободно висящей тканью [10]. Форма сечения является нестабильной, поэтому показана одна её реализация. Ломаная $A_0A_5A_{10}A_{15}A_{20}$ есть результат первого этапа одного из возможных вариантов аппроксимации формы складок. На звене A_0A_5 реализован второй этап аппроксимации с помощью характеристической ломаной $A_0A_1A_2A_3A_4A_5$. Суммарная длина звеньев этой ломаной равна длине дуги A_0A_5 и остается постоянной при локальной модификации, которая является 3-параметрической при фиксированных узлах A_0 и A_5 . Локальная модификация является случайной, так как форма висящей ткани не является стабильной. Промежуточные узлы могут менять свое положение в пределах заданных областей. Соответственно, будет меняться форма дуги A_0A_5 . Положение промежуточных точек случайно, модификация ломаной определяется в локальной системе координат Ox_5y_5 . Для звена A_5A_{10} ломаной первого этапа аппроксимации показана 0-параметрическая локальная модификация формы. Для звена $A_{10}A_{15}$ ломаной первого этапа аппроксимации показана 2-параметрическая локальная модификация формы. А для последнего звена выполнена аппроксимация дугами окружностей и в характеристической ломаной нет необходимости. Модификация формы осуществляется за счет изменения центров и радиусов окружностей.

В качестве ещё одного применения описанной теории можно упомянуть использование сеточных моделей с различными алгоритмами деформирования, учитывающих особенности и геометрическую форму как отдельного элемента модели, так и форму нескольких элементов [11–15]. Но в настоящее время не существует общепринятого метода моделирования с использованием неструктурированных сеток с заданными метрическими условиями.

Заключение

Проблема локальной модификации геометрической формы существует, и её решение может играть существенную роль в прикладных исследованиях, связанных с конструированием геометрических объектов. Однако опубликованных научных работ, в которых локальная модификация геометрической формы объекта была бы предметом исследования, крайне мало.

В статье сделана попытка рассмотреть некоторые подходы к локальной модификации характеристической фигуры конструируемого объекта, сохраняющей постоянными такие метрические характеристики, как длины звеньев характеристической ломаной или суммарная длина ломаной.

Локальная модификация рассматривается для плоских образов и реализуется с помощью метода иерархического разбиения множества узлов характеристической ломаной и изменений координат узловых точек.

Локальная модификация реализована в светонаправляющей конструкции, в которой плоское сечение отражающей поверхности состоит из ломаной с фиксированными длинами звеньев. Дискретные модификации отражающей поверхности генерируют на приемнике ступенчатое распределение энергетической освещенности. Кроме этого, предложена модель поперечного сечения поверхности, пространственная форма которой имеет мягкие подвижные складки. Такая поверхность образуется свободно висящей тканью. В качестве ещё одного перспективного применения описанной теории можно упомянуть использование пространственных сеточных моделей с различными алгоритмами деформирования, учитывающих особенности и геометрическую форму как отдельного элемента модели, так и форму нескольких элементов.

Список источников / References

1. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия: применение в проектировании и на производстве / пер. с англ. Г. П. Бабенко, Г. П. Воскресенский. Москва: Мир, 1982. 304 с.
Foks A., Pratt M. Vychislitel'nayageometriya: primeneniye v proyektirovanii i na proizvodstve / trans. from Engl. by G. P. Babenko, G. P. Voskresenskiy. Moscow, 1982. 304 p. (In Russ.).
2. Жермен-Лакур П., Жорж П. Л., Пистр Ф., Безье П. Математика и САПР: в 2-х кн. Кн. 2. Вычислительные методы. Геометрические методы / пер. с фр. В. В. Коваленко, С. Д. Чигиря. Москва: Мир, 1989. 260 с. ISBN 5-03-000465-3.
Zhhermen-Lakur P., Zhorzh P. L., Pistr F., Bez'ye P. Matematikai SAPR: v 2-kh kn. Kn. 2. Vychislitel'nyye metody. Geometricheskiye metody / trans. from Fr. V. V. Kovalenko, S. D. Chigirya. Moscow, 1989. 260 p. ISBN 5-03-000465-3. (In Russ.).
3. Агеев В. Н. Аппроксимация линий и контуров круговыми дугами // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2012. № 1. С. 003–010. EDN: PQLBQP.

- Ageyev V. N. Approksimatsiya liniyi konturov krugovymi dugami. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Poligrafii Izdatel'skogo Dela*. 2012;1:003–010. EDN: PQLBQP. (In Russ.).
4. Ageev B. N., Ovsyannikova N. I. Metody approksimatsii s pomoshch'yu sopryazhennykh krugovykh dug i kubicheskikh splaynov // Академическая публицистика. 2019. № 2. С. 9–16. EDN: YEEAX. (In Russ.).
- Ageyev V. N., Ovsyannikova N. I. Metody approksimatsii s pomoshch'yu sopryazhennykh krugovykh dug i kubicheskikh splaynov. *Akademicheskaya Publitsistika*. 2019;2:9–16. EDN: YEEAX. (In Russ.).
5. Словеснов А. В. О приближении плоских кривых линиями второго порядка // Сибирские электронные математические известия. 2018. Т. 15. С. 1576–1594. <https://doi.org/10.33048/semi.2018.15.131>. EDN: YXSPID.
- Slovesnov A. V. On approximation of plane curves by conics. *Siberian Electronic Mathematical Reports*. 2018;15:1576–1594. <https://doi.org/10.33048/semi.2018.15.131>. EDN: YXSPID. (In Russ.).
6. Архангельская М. А., Николаев П. М. Метод интерактивной модификации поверхностей NURBS для задач корректировки технологической оснастки // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 3 (175). С. 40–43. EDN: OFHIZN.
- Arhangelskaya M. A., Nikolaev P. M. The method of interactive nurbs surface modification for the task of adjusting tooling. *Informatsionnyye Tekhnologii v Proyektirovanii i Proizvodstve*. 2019;3(175):40–43. EDN: OFHIZN. (In Russ.).
7. Якимов А. Н. Обеспечение чувствительности конечных-элементных моделей микроволновых антенн к внешним деформирующим воздействиям // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1 (41). С. 46–54. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2023-1-6>. EDN: CPLVRY.
- Yakimov A. N. Ensuring the sensitivity of finite element models of microwave antennas to external deforming actions. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2023;1(41):46–54. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2023-1-6>. EDN: CPLVRY. (In Russ.).
8. Юрков В. Ю., Литунев С. Н. Развитие методики расчета устройств закрепления УФ-лака // Омский научный вестник. 2010. № 2 (90). С. 224–227. EDN: QBYRNX.
- Yurkov V. Yu., Litunov S. N. Razvitiye metodiki rascheta ustroystv zakrepleniya UF-laka. *Omsk Scientific Bulletin*. 2010;2(90):224–227. EDN: QBYRNX. (In Russ.).
9. Юрков В. Ю., Литунев С. Н. Основы теории и расчета светонаправляющих конструкций: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 112 с. ISBN 978-5-8149-2112-3. EDN: UZOTTH.
- Yurkov V. Yu., Litunov S. N. Osnovy teorii i rascheta svetonapravlyayushchikh konstruksiy: monografiya. Omsk, 2015. 112 p. ISBN 978-5-8149-2112-3. EDN: UZOTTH. (In Russ.).
10. Бырдина М. В., Мицки М. Ф., Бельшева В. С. Расчет и оптимизация геометрических параметров изделий легкой промышленности конической формы // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2022. Т. 56, № 2. С. 52–56. <https://doi.org/10.46418/0021-3489-2022-56-02-10>. EDN: CDWGTK.
- Byrdina M. V., Mitsik M. F., Belysheva V. S. Calculation and optimization of geometric parameters of light industry products of conical shape. *The News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry*. 2022;56(2):52–56. <https://doi.org/10.46418/0021-3489-2022-56-02-10>. EDN: CDWGTK. (In Russ.).
11. Чижов М. И., Усупов А. А., Троценко А. С. Метод точной оценки близости геометрических форм полигональных моделей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 2. С. 118–122. EDN: XWPOAH.
- Chijov M. I., Usupkhov A. A., Trotsenko A. S. The precise method of the geometric forms similarity estimation for the polygonal models. *Vestnik Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technology*. 2018;2:118–122. EDN: XWPOAH. (In Russ.).
12. Саразов А. В., Козелков А. С. Повышение точности САЕ-моделирования задач аэродинамики с использованием технологии расчета на трехмерных неструктурированных сетках с перекрытиями // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2024. № 2 (145). С. 43–58. EDN: SIGMDF.
- Sarazov A. V., Kozelkov A. S. Increasing accuracy of CAE modeling in aerodynamics using calculation technology on three-dimensional unstructured meshes with overlaps. *Transactions of NNSTU n. a. R. E. Alekseev*. 2024;2(145):43–58. EDN: SIGMDF. (In Russ.).
13. Козубская Т. К., Кудрявцева Л. Н., Цветкова В. О. Анизотропная адаптация подвижной неструктурированной сетки к телам сложной формы, заданным интерполяционным восьмеричным шаблоном // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2022. Т. 62, № 10. С. 1620–1631. <https://doi.org/10.31857/S0044466922100076>. EDN: LHOAYQ.
- Kozubskaya T. K., Kudryavtseva L. N., Tsvetkova V. O. Anisotropic adaptation of moving unstructured mesh to bodies of complex shapes described by an interpolation octree. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2022;62(10):1620–1631. <https://doi.org/10.31857/S0044466922100076>. EDN: LHOAYQ. (In Russ.).
14. Прихач И. В., Мамчиц В. В., Гундина М. А. Приближение окружностью данных, полученных при обработке промышленных изображений // X Машеровские чтения. 2016. С. 25–27. EDN: XXAOOZ.
- Prikhach I. V., Mamchits M. V., Gundina M. A. Priblizheniye okruzhnost'yu dannykh, poluchennykh pri obrabotke promyshlennykh izobrazheniy. *X Masherovskiy chteniye*. 2016:25–27. EDN: XXAOOZ. (In Russ.).
15. Козловский А. Н. Алгоритм обнаружения вершины угла на изображении на основе аппроксимации контура бинарного изображения // Международный научный журнал. 2016. № 9. С. 63–73. EDN: WWRMHT.
- Kozlovskiy A. N. Vertex detection algorithm in image processing based on binary image contour approximation. *Mezhdunarodnyy Nauchnyy Zhurnal*. 2016;9:63–73. EDN: WWRMHT. (In Russ.).
-
- Вклад авторов:**
В. Ю. Юрков. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, формулировка выводов, формулировка гипотезы о недостаточности существующих методик, выбор направления исследования, общее редактирование текста.
М. А. Чижик. Выбор направления исследования, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами решения проблемы моделирования формы висящих тканей, общее редактирование текста.
С. Н. Литунев. Выбор направления исследования, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами решения проблемы моделирования светонаправляющих конструкций, общее редактирование текста.
С. С. Дубова. Обзор отечественных и зарубежных источников, вывод и адаптация расчетных формул, реализация исследования.
- Authors' contribution:**
Viktor Yu. Yurkov. Setting an aim, research objectives and scientific problem, formulating conclusions, formulating a hypothesis about the insufficiency of existing methods, choosing a research direction, general text editing.

Margarita A. Chizhik. Choosing a research direction, identifying the shortcomings of existing methods, comparing with alternative approaches to solving the problem of modeling the shape of hanging tissues, general text editing.

Sergei N. Litunov. Choosing a research direction, identifying shortcomings of existing methods, comparing with alternative approaches to solving the problem of modeling light-guiding structures, general text editing.

Svetlana S. Dubova. Reviewing of domestic and foreign sources, conclusion and adaptation of formulae calculation, implementation of the results.

Информация об авторах:

ЮРКОВ Виктор Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструирование и технология изделий легкой промышленности» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2414-1438

AuthorID (РИНЦ):173644

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2667-8103>

ResearcherID: B-1414-2019

e-mail: viktor_yurkov@mail.ru

ЧИЖИК Маргарита Анатольевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и технология изделий легкой промышленности» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7582-7019

AuthorID (РИНЦ): 474040

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0797-875X>

AuthorID (SCOPUS): 13406046300

e-mail: margarita-chizhik@rambler.ru

ЛИТУНОВ Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4424-2696

AuthorID (РИНЦ): 368928

e-mail: litunov-sergey@mail.ru

ДУБОВА Светлана Сергеевна, аспирант, ассистент кафедры «Конструирование и технология изделий легкой промышленности» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4638-2933

AuthorID (РИНЦ):1313036

e-mail: dubovasveta1@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.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 14.01.2026; одобрена после рецензирования 12.02.2026; принята к публикации 28.07.2026.

Information about the authors:

YURKOV Viktor Yurievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Design and Technology of Light Industry Products, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 2414-1438

AuthorID(RSCI):173644

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2667-8103>

ResearcherID: B-1414-2019

e-mail: viktor_yurkov@mail.ru

CHIZHIK Margarita Anatolievna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Technology of Light Industry Products, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7582-7019

AuthorID (RSCI): 474040

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0797-875X>

AuthorID (SCOPUS): 13406046300

e-mail: margarita-chizhik@rambler.ru

LITUNOV Sergei Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Industrial Ecology and Safety Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4424-2696

AuthorID (RSCI): 368928

e-mail: litunov-sergey@mail.ru

DUBOVA Svetlana Sergeevna, Postgraduate, Assistant of the Department of Design and Technology of Light Industry Products, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4638-2933

AuthorID (RSCI):1313036

e-mail: dubovasveta1@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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 14.01.2026; approved after reviewing 12.02.2026; accepted for publication 28.07.2026.

РАЗРАБОТКА И РАСЧЁТНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛНОВОГО ГИДРОДИОДА С ПРОФИЛЕМ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКИХ СПЛАЙНОВ

С. Ю. Кайгородов 

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

 Sergey7-2005@mail.ru

В статье был предложен волновой гидродiode — пассивное гидравлическое устройство, в котором периодическое изменение полузазора вдоль канала формирует различие гидравлических сопротивлений в прямом и обратном направлениях течения.

Профиль проточной части задан кубическим сплайном. Геометрия полностью определяется тремя независимыми параметрами: минимальным полузазором, полузазором в точке сшивки и относительной координатой точки сшивки. Численное моделирование выполнено методами вычислительной гидродинамики Computational Fluid Dynamics на основе стационарных осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса и модели турбулентности $k-\omega$. Дифференциально-геометрический анализ показал, что нулевая четвёртая производная кубического сплайна внутри каждого полиномиального участка ограничивает воспроизведение резких разрывов кривизны, необходимых для эффективного вихревого запираания потока.

Полученные результаты демонстрируют, что сплайновая параметризация эффективна для плавных профилей, сокращая число варьируемых переменных, но требует замены на дискретные модели для геометрий с локальной агрессивностью кромок. Итоги исследования закладывают основу для многокритериальной топологической оптимизации пассивных запорных устройств ядерных реакторов.

Ключевые слова: гидродiode, волновой канал, кубический сплайн, турбулентная диссипация, диодность, CFD-моделирование, дифференциальная геометрия, пассивные системы безопасности

Для цитирования: Кайгородов С. Ю. Разработка и расчётный анализ волнового гидродиода с профилем проточной части на основе кубических сплайнов // Омский научный вестник. 2026. № 3 (199). С. 31—38. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-31-38>. EDN: WVRGRQ.



© Кайгородов С. Ю., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT AND COMPUTATIONAL ANALYSIS OF A WAVE HYDRODIODE WITH A FLOW PATH PROFILE BASED ON CUBIC SPLINES

S. Yu. Kaigorodov 

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

 Sergey7-2005@mail.ru

The article introduces a wave hydrodiode — a passive hydraulic device in which periodic variation of the half-gap along the channel creates a difference in hydraulic resistance between forward and reverse flow directions.

The profile of the flow section is defined by a cubic spline. The geometry is fully determined by three independent parameters: the minimum half-gap, the half-gap at the splice point, and the relative coordinate of the splice point. Numerical simulation is performed using Computational Fluid Dynamics methods based on steady-state Reynolds-averaged Navier—Stokes equations and the $k-\omega$ turbulence model. Differential-geometric analysis has shown that the zero fourth derivative of the cubic spline within each polynomial segment limits the reproduction of sharp curvature discontinuities necessary for effective vortex-based flow

blocking. The obtained results demonstrate that spline parameterization is effective for smooth profiles, reducing the number of variable parameters, but requires replacement with discrete models for geometries with local edge aggressiveness. The findings lay the groundwork for multi-criteria topological optimization of passive shut-off devices for nuclear reactors.

Keywords: hydrodiode, wave channel, cubic spline, turbulent dissipation, diodicity, CFD simulation, differential geometry, passive safety systems

For citation: Kaigorodov S. Yu. Development and computational analysis of a wave hydrodiode with a flow path profile based on cubic splines. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):31–38. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-31-38>. EDN: WVRGRQ. (In Russ.).



© Kaigorodov S. Yu., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Гидродииоды — пассивные гидравлические устройства с существенно различным сопротивлением в прямом и обратном направлениях потока. Количественной мерой этого свойства служит диодность D — отношение массового расхода в прямом направлении к массовому расходу в обратном при одинаковом перепаде давления Δp . Гидродииоды применяются в системах аварийного расхолаживания ядерных реакторов, контурах естественной циркуляции, системах отвода остаточного тепла DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System — вспомогательная система расхолаживания реактора) и гидравлических приводах, где требуется преимущественное течение теплоносителя без подвижных частей [1, 2]. В проектах реакторов SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor — быстрый реактор с натриевым теплоносителем) и FHR (Fluoride-Salt-Cooled High-Temperature Reactor — высокотемпературный реактор с фторидным теплоносителем) гидродииоды подавляют паразитные обратные токи при авариях LOFC (Loss Of Forced Circulation — потеря принудительной циркуляции) [3, 4].

В литературе сформировалось несколько классов гидродииодов [5–13]. Конфузорно-диффузорные элементы используют чередование сужающихся (конфузор) и расширяющихся (диффузор) участков и обычно дают $D < 1,5$ [12]. Лабиринтные схемы образуют путь потока в виде «змейки» с резкими поворотами, что повышает потери давления в прямом направлении [13]. Вихревые диоды — устройства с камерой закручивания и тангенциальным подводом потока — способны давать D до 12 и выше [9]. Клапаны Тесла — пассивные канальные элементы с последовательными петлевыми каналами — линейны и компактны, однако их стационарная диодность обычно составляет 1–2 [10]. Значение $D > 2$ достигается либо многоступенчатыми схемами [8], либо нестационарными пульсирующими режимами [6].

Общая проблема дискретных конструкций — большое число геометрических переменных: форма канала задаётся координатами десятков пластин, что затрудняет прямую оптимизацию [14], хотя в современных работах для обхода этих трудностей успешно применяются методы топологической оптимизации [15]. В работе предложено задавать волновой канал, то есть канал, ширина которого периодически изменяется по длине в виде плавной волны, непрерывной огибающей на основе кубического сплайна. Огибающая здесь — плавная кривая, задающая общую форму канала. Кубический сплайн — кусочно-кубическая функция, непрерывная вместе

с первой и второй производными; такой профиль относится к классу C^2 .

Физическое обоснование

Предварительные исследования [14] показали, что сплошные волновые каналы без дискретных полостей обладают диодностью $D \approx 1$. Под сплошным каналом понимается канал с гладкой стенкой без системы отдельных пластин и карманов. Диодность формируется в карманах — полостях между наклонными пластинами. Сплайновая огибающая задаёт общую макроформу этих полостей.

Прямым направлением далее считается течение слева направо, при котором поток проходит канал с меньшим гидравлическим сопротивлением; обратным — течение справа налево. В прямом направлении C^2 -гладкость профиля обеспечивает плавное изменение кривизны и благоприятный градиент давления, что способствует безотрывному обтеканию, то есть течению без отделения пограничного слоя от стенки. Пограничный слой — тонкий слой жидкости у стенки, в котором влияние вязкости существенно.

В обратном направлении поток набегает на тыльную сторону пластин и загоняется в карманы; на краях происходит отрыв пограничного слоя — потеря контакта пристеночного слоя со стенкой с образованием областей обратного течения. Формируются рециркуляционные зоны — области течения с возвратным или замкнутым вихревым движением, а кинетическая энергия потока гасится вязким трением и турбулентной диссипацией — переходом энергии турбулентных пульсаций, то есть случайных колебаний скорости и давления в тепло. Запирание потока в данном исследовании понимается как резкое увеличение гидравлического сопротивления в обратном направлении.

Математическая модель сплайнового профиля

Канал имеет квадратное поперечное сечение 20×20 мм. Геометрия симметрична относительно продольной оси, поэтому профиль описывается функцией полузазора $S(x)$ — расстояния от оси симметрии до стенки. Здесь x — продольная координата вдоль оси канала, мм; для одного периода принято $x = 0$ в начале периода и $x = L_{\text{per}}$ в его конце. Один период длиной L_{per} делится на два участка: диффузорный ($0 \leq x \leq l$, полузазор растёт от r_1 до r_2) и конфузорный ($l \leq x \leq L_{\text{per}}$, полузазор убывает от r_2 до r_1). Здесь $l = \lambda L_{\text{per}}$ — координата точки сшивки диффузорного и конфузорного участков, в которой задано значение полузазора; $S(l) = r_2$;

$\lambda \in (0,1)$ — параметр асимметрии. При этом в силу условий C^2 -сшивки и «зажатых концов» фактический локальный максимум профиля смещён вправо от точки сшивки и превышает r_2 ; для рассчитанных конфигураций $S_{\max} = 6,82$ мм при $x \approx 26,3$ мм для Spline-Sin и $S_{\max} = 9,46$ мм при $x \approx 25,6$ мм для Spline-KD2 при табличных $r_2 = 4,8$ и $7,1$ мм соответственно.

На каждом участке профиль задаётся кубическим полиномом:

$$S_1(x) = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + d_1, \quad 0 \leq x \leq l, \\ S_2(x) = a_2 (x-l)^3 + b_2 (x-l)^2 + c_2 (x-l) + d_2, \quad l \leq x \leq L_{\text{per}}, \quad (1)$$

где $S_1(x)$ и $S_2(x)$ — полузазоры на первом и втором участках периода; $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2$ — коэффициенты кубических полиномов, определяемые из граничных условий и условий сшивки. Штрих далее означает производную по координате x : $S' = dS/dx$, $S'' = d^2S/dx^2$, $S''' = d^3S/dx^3$.

Для определения восьми коэффициентов накладывается система условий, обеспечивающая C^2 -гладкость внутри периода: значения полузазора на концах периода и в точке сшивки ($S_1(0) = r_1$, $S_2(L_{\text{per}}) = r_1$, $S_1(l) = S_2(l) = r_2$); условия «зажатых концов», то есть нулевые первые производные на концах периода $S_1'(0) = 0$, $S_2'(L_{\text{per}}) = 0$; непрерывность первой и второй производных в точке сшивки ($S_1'(l) = S_2'(l)$, $S_1''(l) = S_2''(l)$). Из граничных условий следуют $d_1 = r_1$, $c_1 = 0$. Решение полной системы линейных уравнений позволяет выразить все коэффициенты через три независимых параметра: r_1, r_2 и λ при фиксированном L_{per} . При повторении периодов дополнительно контролируется непрерывность S и S' на границе периодов; непрерывность S'' на этой границе при необходимости обеспечивается отдельным условием периодичности.

Дискретизация огибающей и построение геометрии

Сплайн задаёт только огибающую. Физическая конструкция — набор $N = 20$ наклонных пластин на каждой стенке. Параметры пластин фиксированы: толщина $t = 1$ мм; угол наклона к горизонту $\alpha = 30^\circ$; отступы от торцов $M = 40$ мм; полная длина канала L_{total} . Для рассчитанных конфигураций с тремя периодами $L_{\text{total}} = 3L_{\text{per}} + 2M$. Пластины размещаются равномерно в рабочей зоне с шагом

$$\Delta x_{\text{step}} = \frac{L_{\text{total}} - 2M}{N - 1}. \quad (2)$$

Для i -й пластины, где $i = 1, \dots, N$ — координата точки крепления пластины на стенке принята равной

$$x_{\text{wall}, i} = M + (i - 1)\Delta x_{\text{step}}, \quad (3)$$

через $y_i^{(n)}$ обозначена вертикальная координата вершины пластины относительно оси канала на n -й итерации; через $x_{\text{proj}}^{(n)}$ — горизонтальная координата проекции этой вершины. Здесь $n = 0, 1, 2, \dots$ — номер итерации. Из-за наклона пластины вершина смещена по горизонтали относительно точки крепления.

Для точного позиционирования применяется итерационный алгоритм:

$$y_i^{(0)} = S(x_{\text{wall}, i}), \quad x_{\text{proj}}^{(n)} = x_{\text{wall}, i} + y_i^{(n)} \tan(60^\circ),$$

$$y_i^{(n+1)} = S(x_{\text{proj}}^{(n)}). \quad (4)$$

Критерий останова: $|y_i^{(n+1)} - y_i^{(n)}| < 10^{-6}$ мм. Множитель учитывает, что угол между пластиной и вертикалью равен 60° . Горизонтальная проекция толщины пластины составляет

$$t_{\text{horiz}} = \frac{t}{\cos(60^\circ)} = 2 \text{ мм}. \quad (5)$$

Минимальный вертикальный зазор $S_{\min}$ между верхними и нижними пластинами контролируется по результатам построения геометрии и для технологически реализуемой конструкции должен составлять не менее 3 мм.

Методология численного моделирования

Расчёты выполнены в ANSYS CFX 2023 R2 стационарный решатель. Рабочая среда — вода при 20°C ; $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$ — плотность; $\mu = 1,003 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ — динамическая вязкость. Математическая модель — стационарные уравнения Навье — Стокса, осреднённые по Рейнольдсу (RANS — Reynolds-Averaged Navier — Stokes), с замыканием $k - \omega$. Здесь k — турбулентная кинетическая энергия; ω — удельная скорость её диссипации.

Выбор модели $k - \omega$ обоснован следующим. Во-первых, она относится к двухпараметрическим моделям, интегрируемым до стенки сквозь вязкий подслой без пристеночных функций и корректно воспроизводит пристеночные и отрывные течения с неблагоприятным градиентом давления при умеренных числах Рейнольдса [11, 16]. Во-вторых, определяющее влияние на гидравлическое сопротивление оказывают не осреднённые параметры основного сечения, а локальные: течение в зазорах между пластинами (характерный размер $2 - 3$ мм, $Re \sim 10^3$) и слои смещения за кромками пластин при обратном течении, где локальные числа Рейнольдса, построенные на перепаде скоростей и толщине слоя смещения, существенно превышают критические значения устойчивости слоя, что приводит к турбулизации даже при умеренном глобальном Re . Расчёты гидродиазов и клапанов Тесла в диапазоне $Re = 10^3 - 10^4$ в литературе выполняются с двухпараметрическими RANS-моделями, включая $k - \omega$ [6, 8, 9, 15]. В-третьих, при низком уровне турбулентности на входе модель не генерирует турбулентность искусственно в невозмущённых областях потока. Теплообмен не учитывается (адиабатический режим, то есть отсутствие теплообмена со стенками).

Граничные условия: на входе и выходе задан постоянный перепад давления $\Delta p = 2$ атм ($P_{\text{вх}} = 202650$ Па избыточного давления, $P_{\text{вых}} = 0$ Па избыточного давления; избыточное давление отсчитывается от атмосферного, $1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па}$). Для обратного направления вход и выход менялись местами. На стенках — условие прилипания (no-slip), то есть скорость жидкости на стенке равна нулю. На входе задан низкий уровень турбулентности — интенсивность турбулентности 1 %.

Сетка — структурированная гексаэдрическая, то есть состоящая из упорядоченных шестигранных ячеек; $2,5 - 3,4$ млн узлов в зависимости от конфигурации. Пристеночное разрешение $y^+ \leq 2$, где y^+ — стандартное безразмерное расстояние до стенки, используемое для оценки рас-

решения вязкого подслоя, то есть тонкой области у стенки, где определяющую роль играет молекулярная вязкость. Локальные сгущения выполнены вблизи пластин и в зазорах (размер ячейки не более 0,5 мм). Проверка сеточной сходимости, то есть независимости решения от измельчения сетки, выполнена на трёх сетках: различие массовых расходов между средней и мелкой сетками не превышало 1 %. Критерии сходимости: остаточные невязки уравнений, то есть мера невязки дискретизированных уравнений, менее 10^{-5} ; дисбаланс массы, то есть относительная разница массовых расходов на входе и выходе, менее 0,1 %.

Характерное число Рейнольдса определяется как $Re = \rho U L_c / \mu$, где U — средняя по расходу характерная скорость основного канала; L_c — характерный гидравлический размер; для основного квадратного сечения 20×20 мм принят гидравлический диаметр 20 мм. Для основного канала $Re \sim 10^4 - 10^5$, в зазорах между пластинами при характерном размере зазора $Re \sim 10^3$.

Критерий диодности:

$$D = \frac{|\dot{m}_{\text{прям}}|}{|\dot{m}_{\text{обр}}|} \text{ при } |\Delta p| = \text{const}, \quad (6)$$

где $\dot{m}$ — массовый расход; индексы «прям» и «обр» обозначают прямое и обратное направления течения.

Результаты моделирования и анализ характеристик

Были синтезированы две сплайновые конфигурации: Spline-Sin и Spline-KD2 — условные назва-

ния профилей с разной глубиной модуляции сечения, то есть с разным различием полузазора в точке сшивки r_2 и минимального полузазора r_1 . Названия используются только для различения конфигураций. Геометрические параметры приведены в табл. 1; результаты расчётов — в табл. 2.

Конфигурация Spline-Sin показала диодность $D = 2,54$ при прямом массовом расходе 0,676 кг/с. Картина течения в обоих направлениях представлена на рис. 1. Это выше типичных значений для простых конфузочно-диффузорных элементов, для которых обычно $D < 1,5$ [12], и одноступенчатых клапанов Тесла, работающих в диапазоне $D = 1 - 2$ [10]. Для микроканалов, то есть каналов с характерным размером порядка единиц миллиметров и менее, при низких числах Рейнольдса характерно $D \approx 1,43$ [7]. Порог $D > 2$ для клапанов Тесла достигается либо многоступенчатыми схемами [8], либо нестационарными пульсирующими потоками [6]. Вихревые диоды дают большие значения D , но требуют принципиально иной компоновки с тангенциальным подводом [9]. Таким образом, $D = 2,54$ для линейного стационарного сплайнового канала, то есть прямолинейного канала без подвижных частей, является конкурентоспособным результатом. Сравнение с литературой носит качественный характер, поскольку конструкции различаются масштабом, числами Рейнольдса, перепадом давления и рабочей жидкостью.

Для конфигурации Spline-KD2 с большей амплитудой модуляции ($r_2 = 7,1$ мм против 4,8 мм) диодность составила $D = 1,64$. Прямой расход остался приемлемым (0,524 кг/с), но обратный расход оказался выше ожидаемого (0,320 кг/с). Линии тока для данной конфигурации показаны на рис. 2. Дополни-

Таблица 1. Геометрические параметры сплайновых моделей
Table 1. Geometric parameters of spline models

Параметр	Spline-Sin	Spline-KD2
r_1 (минимальный полузазор), мм	1,7	1,5
r_2 (полузазор в точке сшивки), мм	4,8	7,1
S_{max} (фактический максимальный полузазор), мм	6,82	9,46
$x(S_{\text{max}})$ (координата фактического максимума), мм	$\approx 26,3$	$\approx 25,6$
l (координата точки сшивки, в которой $S = r_2$), мм	12	14
L_{per} (длина периода), мм	70	66
$\lambda = l / L_{\text{per}}$	0,171	0,212
Число периодов	3	3
L_{total} (полная длина канала), мм	290	278
N (число пластин на каждой стенке)	20	30°
α (угол наклона пластин к горизонту)	30°	
t (толщина пластины), мм	1	1
M (отступ от торцов), мм	40	40
S_{min} (минимальный вертикальный зазор), мм	$\approx 3,0$	$\approx 1,1$

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Таблица 2. Гидравлические характеристики сплайновых гидродиодов
($\Delta p = 2$ атм)

Конфигурация	$\dot{m}_{\text{прям}}$, кг/с	$\dot{m}_{\text{обр}}$, кг/с	Диодность, D
Spline-Sin	0,676	0,266	2,54
Spline-KD2	0,524	0,320	1,64

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

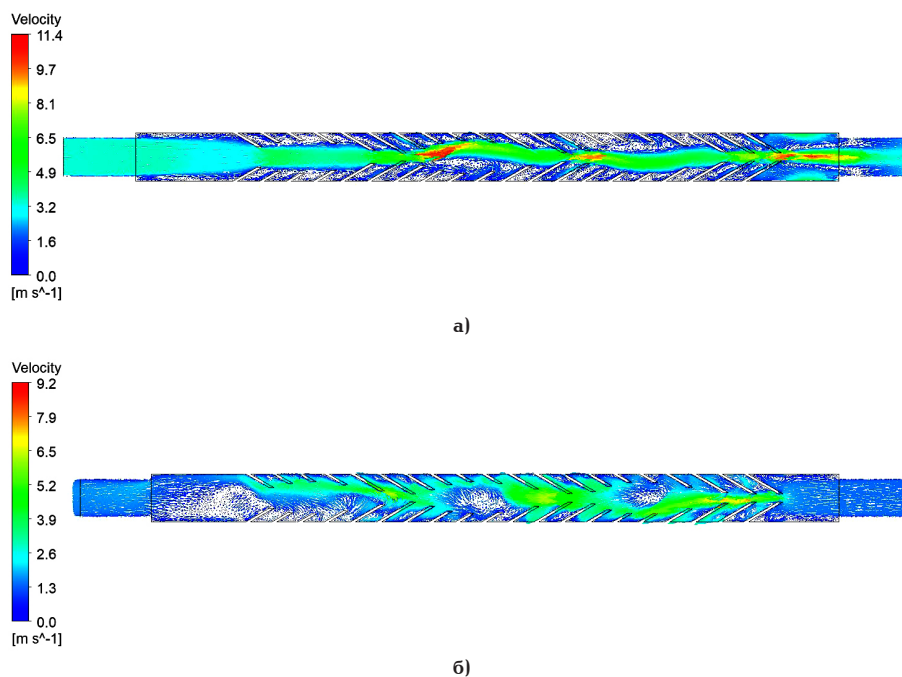


Рис. 1. Линии тока волнового канала с кубическим сплайном Spline-Sin:
а) прямое направление; б) обратное направление
Fig. 1. Current lines of a wave channel with the Spline-Sin cubic spline:
a) forward direction; б) reverse direction

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

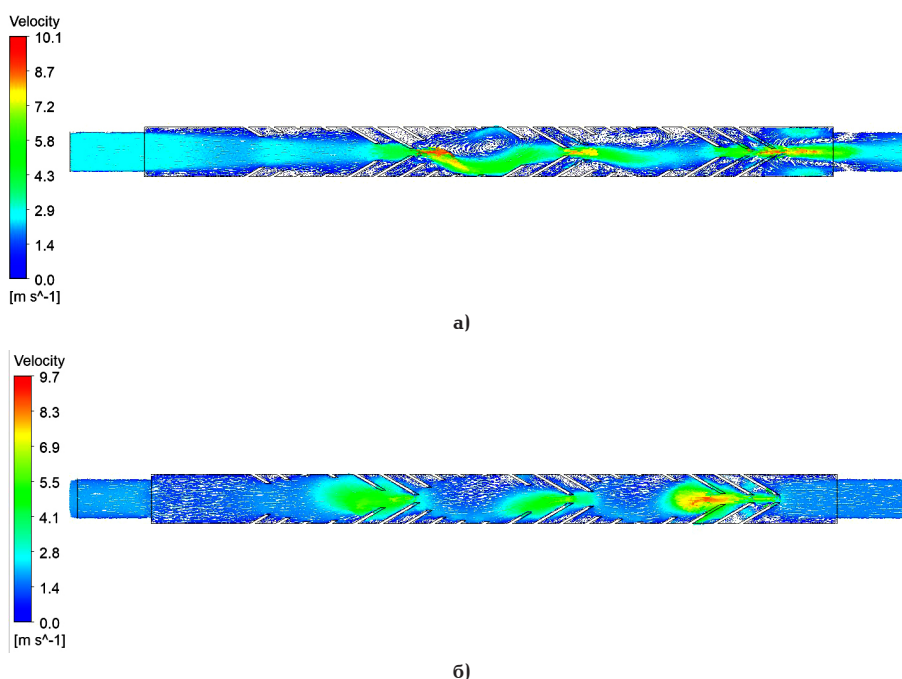


Рис. 2. Линии тока волнового канала с кубическим сплайном Spline-KD2:
а) прямое направление; б) обратное направление
Fig. 2. Current lines of a wave channel with the Spline-KD2 cubic spline:
a) forward direction; б) reverse direction

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

тельный фактор — малый минимальный вертикальный зазор $S_{\min} \approx 1,1$ мм, который повышает общее сопротивление в обоих направлениях и уменьшает относительную разницу между ними; малый зазор является следствием смещения фактического максимума огибающей ($S_{\max} = 9,46$ мм), при котором проходное сечение в наиболее широкой части периода оказывается почти полностью перекрытым выступами пластин. Поэтому конфигурация Spline-

KD2 не удовлетворяет принятому технологическому ограничению $S_{\min} \geq 3$ мм и рассматривается как расчётный случай для анализа предела сглаживания. Наблюдаемое снижение диодности указывает на то, что кубический сплайн сглаживает резкие геометрические элементы, необходимые для сильного запираения потока. Поскольку рассчитаны только две конфигурации, данный вывод носит предварительный характер.

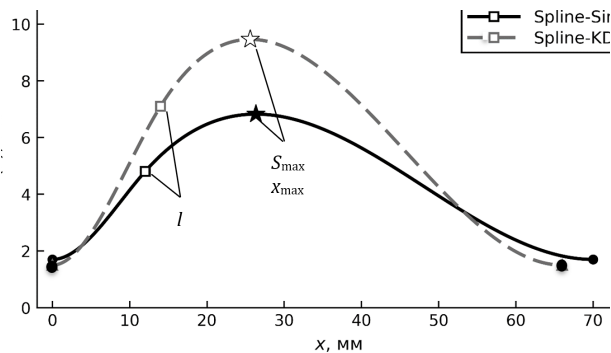


Рис. 3. Профиль полузазора $S(x)$ одного периода для конфигураций Spline-Sin и Spline-KD2: круги (●) — концы периода с минимальным полузазором $S = r_1$ ($x = 0$ и $x = L_{per}$); квадраты (□) — точка сшивки $x = l$ с полузазором $S = r_2$; звездочка (★) — фактический локальный максимум $S_{max} > r_2$ в точке $x_{max} > l$ для Spline-Sin $S_{max} = 6,82$ мм при $x_{max} \approx 26,3$ мм и для Spline-KD2 $S_{max} = 9,46$ мм при $x_{max} \approx 25,6$ мм

Fig. 3. Half-gap profile $S(x)$ of one period for the Spline-Sin and Spline-KD2 configurations: circles (●) — period ends with the minimum half-gap $S = r_1$ ($x = 0$ and $x = L_{per}$); squares (□) — splice point $x = l$ with half-gap $S = r_2$; stars (★) — actual local maximum $S_{max} > r_2$ at $x_{max} > l$; $S_{max} = 6.82$ mm at $x_{max} \approx 26.3$ mm for Spline-Sin and $S_{max} = 9.46$ mm at $x_{max} \approx 25.6$ mm for Spline-KD2

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

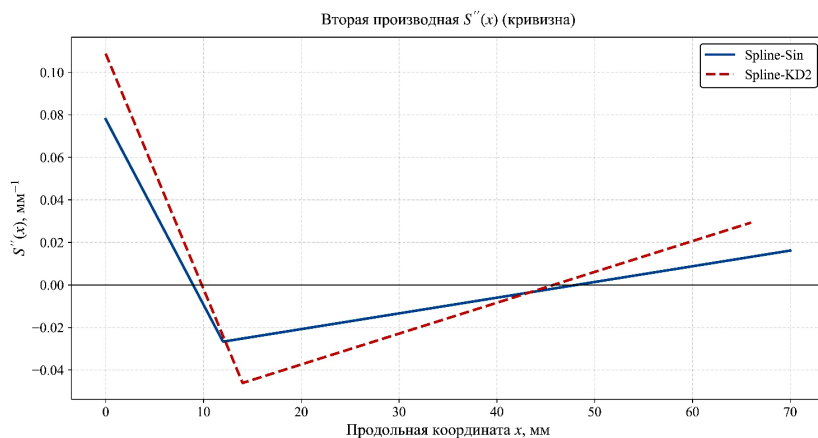


Рис. 4. Вторая производная $S''(x)$ (кривизна профиля) для конфигураций Spline-Sin и Spline-KD2

Fig. 4. Second derivative $S''(x)$ (profile curvature) for Spline-Sin and Spline-KD2 configurations

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

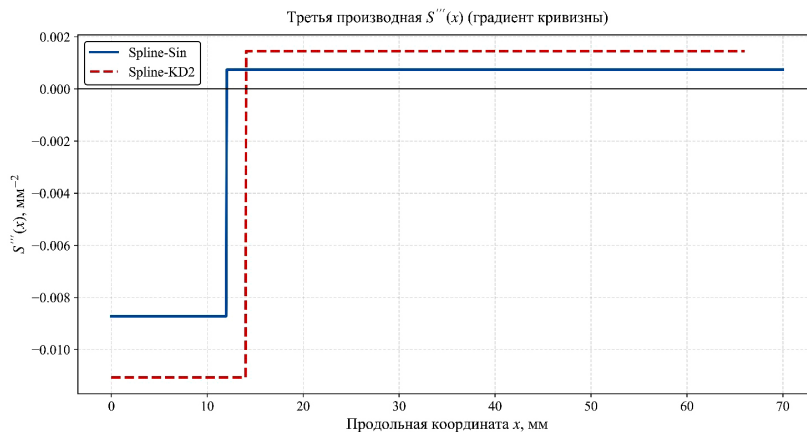


Рис. 5. Третья производная $S'''(x)$ (градиент кривизны) для конфигураций Spline-Sin и Spline-KD2

Fig. 5. Third derivative $S'''(x)$ (curvature gradient) for Spline-Sin and Spline-KD2 configurations

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Дифференциально-геометрические ограничения кубических сплайнов

Для объяснения различий между конфигурациями используются производные полузазора: $S''(x) = d^2S/dx^2$ — вторая производная, связанная с кривизной профиля; $S'''(x) = d^3S/dx^3$ — третья производная, связанная с градиентом кривизны; $S^{(IV)}(x) = d^4S/dx^4$ — четвёртая производная. Резкие дискретные конструкции опираются на локальные скачки $S''(x)$ и локализованные пики $S'''(x)$, которые формируют геометрические «ступеньки» и обеспечивают жёсткий отрыв пограничного слоя при обратном обтекании.

Кубический сплайн кусочно-полиномиален третьей степени, поэтому его четвёртая производная равна нулю внутри каждого полиномиального участка:

$$S^{(IV)}(x) = 0. \quad (7)$$

Условия C^2 -сшивки означают, что $S''(x)$ непрерывна внутри периода и в точке сшивки, а $S'''(x)$ кусочно-постоянна, то есть принимает по одному постоянному значению на каждом участке периода. Следовательно, сплайн не способен воспроизвести разрывы $S''(x)$ и резкие локальные изменения $S'''(x)$. Он выступает как геометрический сглаживающий фильтр, ограниченный в воспроизведении локальных пиков высших производных.

На рис. 3–5 приведены графики полузазора $S(x)$ и его производных $S''(x)$ и $S'''(x)$ для обеих конфигураций. Профиль $S(x)$ (рис. 3) демонстрирует, что Spline-KD2 имеет более крутые склоны и большую амплитуду модуляции по сравнению с Spline-Sin. Вторая производная $S''(x)$ (рис. 4) непрерывна, однако её поведение различно: у Spline-Sin кривизна меняется плавно, а у Spline-KD2 наблюдаются более резкие изменения, что связано с попыткой описать сплайном агрессивную геометрию. Третья производная $S'''(x)$ (рис. 5) на каждом из двух полиномиальных участков периода остаётся постоянной, испытывая разрыв в точке сшивки $x = 1$. Это прямое следствие кубической сплайн-интерполяции: $S'''(x)$ кусочно-постоянна, а $S^{(IV)}(x) = 0$ внутри участков. Таким образом, сплайн не способен воспроизвести локализованные пики S''' и разрывы S'' , необходимые для эффективного вихревого запираания в резких профилях.

В модели Spline-KD2 попытка описать резкий профиль сплайном привела к сглаживанию склонов карманов и смещению точек отрыва пограничного слоя. В результате обратный поток обтекания выступы без формирования интенсивных дискретных вихрей, турбулентная диссипация снизилась, и диодность уменьшилась до 1,64. Для профилей с плавным изменением кривизны, таких как Spline-Sin, сплайновая модель эффективна. Для резких профилей нужны другие геометрические представления: прямое задание координат пластин или сплайновые модели более высоких порядков.

Заключение

В работе предложена, математически описана и исследована методом вычислительной гидродинамики концепция сплайнового волнового гидродиода.

Задание профиля стенки в виде непрерывного кубического сплайна с зажатými концами позволяет свести число варьируемых геометрических параметров к трём (r_1 , r_2 , λ) при фиксированных конструктивных параметрах ($N = 20$, $\alpha = 30^\circ$, $t = 1$ мм,

$M = 40$ мм). Это открывает путь к построению приближённых или суррогатных моделей, заменяющих полные CFD-расчёты, и к многокритериальной оптимизации.

Для плавного профиля Spline-Sin достигнута диодность $D = 2,54$ при перепаде давления $\Delta p = 2$ атм. Этот показатель сопоставим с диодностью многоступенчатых клапанов Тесла и существенно превосходит значения, характерные для простых диффузорно-конфузорных элементов ($D < 1,5$), при сохранении простой линейной геометрии.

Дифференциально-геометрический анализ, подтверждённый графиками производных (рис. 4, 5), показал, что кубический сплайн является сглаживающим фильтром. Равенство $S^{(IV)} = 0$ внутри полиномиальных участков и кусочная постоянность S''' делают невозможным воспроизведение разрывов кривизны и локализованных пиков градиента кривизны. Поэтому предложенная модель не может заменить дискретную параметризацию для конфигураций, диодный эффект которых опирается на локальную геометрическую «агрессивность», то есть на резкие выступы, ступеньки и малые радиусы скругления (Spline-KD2: $D = 1,64$).

Ограничения работы: результаты получены для двух конфигураций при единственном значении Δp ; экспериментальная верификация отсутствует. Течение в канале формально относится к переходному диапазону чисел Рейнольдса. Корректность осреднённой постановки обоснована выбором низкорейнольдсовой модели $k-\omega$ и низким уровнем турбулентности на входе; для окончательной верификации планируется сопоставление с ламинарным расчётом и нестационарный расчёт (URANS/LES). Для подтверждения выявленных закономерностей необходима серия расчётов с вариацией параметров $r_1 \in [1,5; 5,0]$ мм, $r_2 \in [5,0; 9,0]$ мм, $\lambda \in [0,1; 0,4]$ и построение приближённых зависимостей $D(r_1, r_2, \lambda)$, что является целью дальнейших исследований.

Финансирование / Funding

Исследование выполнено за счёт средств гранта Российского научного фонда № 25-29-20049 и гранта Омской области (соглашение № 7).

The research was funded by the Russian Science Foundation grant No. 25-29-20049 and by the Omsk Region grant (agreement No. 7).

Список источников / References

- Yoder G. L. Jr., Elkassabgi Y. M., De Leon G. I. [et al.]. Vortex diode analysis and testing for fluoride salt-cooled high-temperature reactors. Oak Ridge National Laboratory, 2011.
- Ly Q., Chen M., Sun X. [et al.]. Design of fluidic diode for a high-temperature DRACS test facility. *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings (ICONE. 4)*. <https://doi.org/10.1115/ICONE21-16902>.
- Shin S., Jeong J. H., Lim D. K. [et al.]. Design of SFR fluidic diode axial port using topology optimization. *Nuclear Engineering and Design*. 2018;338:63–73. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.07.028>.
- Chikazawa Y., Aizawa K., Shiraishi T., Sakata H. Experimental demonstration of flow diodes applicable to a passive decay heat removal system for sodium-cooled reactors. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2009;46(4):321–330. <https://doi.org/10.1080/18811248.2007.9711537>.
- Purwidyantri A., Prabowo B. A. Tesla valve microfluidics: the rise of forgotten technology. *Chemosensors*. 2023;11(4):256. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11040256>.

6. Nguyen Q. M., Abouezzi J., Ristroph L. Early turbulence and pulsatile flows enhance diodicity of Tesla's macrofluidic valve. *Nature Communications*. 2021;12:2884. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23009-y>.
7. Liosis C., Papadatos A., Pagonis D.-N. [et al.]. Diodicity of MicroTesla valves under various re numbers. *Micromachines*. 2025;16(12):1329. <https://doi.org/10.3390/mi16121329>.
8. Wang P., Hu P., Liu L. [et al.]. On the diodicity enhancement of multistage Tesla valves. *Physics of Fluids*. 2023;35(5):052010. <https://doi.org/10.1063/5.0145172>.
9. Kulkarni A. A., Ranade V. V., Rajeev R., Koganti S. B. Pressure drop across vortex diodes: experiments and design guidelines. *Chemical Engineering Science*. 2009;64(6):1285–1292. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.10.060>.
10. Tesla N. Valvular conduit. US patent 1,329,559. 23 Feb. 1920.
11. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994;32(8):1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>.
12. Stemme E., Stemme G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump. *Sensors and Actuators A: Physical*. 1993;39(2):159–167. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(93\)80213-Z](https://doi.org/10.1016/0924-4247(93)80213-Z).
13. Балуев Д. Е., Гусев Д. В., Мешков С. И. [и др.]. Исследование функциональных характеристик обратного клапана системы безопасности на масштабной модели // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2015. Т. 1, № 2. С. 103–110. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.1.11>. EDN: VSUXEN.
14. Baluev D. E., Gusev D. V., Meshkov S. I. [et al.]. Study of functional characteristics for safety system check valve using scaled model. *Nuclear Energy and Technology*. 2015;1(2):103–110. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.1.11>. EDN: VSUXEN. (In Russ.).
15. Shcherba V. E., Khait A. A., Kaigorodov S. Yu. [et al.]. Multidimensional optimization of the high-diodicity diaphragm hydrodiode for passive safety systems of nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2026;450:114803. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2026.114803>.
16. Lim D. K., Song M. S., Chae H., Kim E. S. Topology optimization on vortex-type passive fluidic diode for advanced nuclear reactors. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019;51(5):1279–1288. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.03.018>.
17. Wilcox D. C. Formulation of the K-omega turbulence model revisited. *AIAA Journal*. 2008;46(11):2823–2838. <https://doi.org/10.2514/1.36541>.

Информация об авторе:

КАЙГОРОДОВ Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Гидромеханика

и транспортные машины» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4982-0580

AuthorID (РИНЦ): 686382

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4085-1809>

AuthorID (SCOPUS): 686382

e-mail: Sergey7-2005@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.

При подготовке данной рукописи автор не использовал генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 17.08.2026; одобрена после рецензирования 01.09.2026; принята к публикации 18.09.2026.

Information about the author:

KAIGORODOV Sergei Yurevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4982-0580

AuthorID (RSCI): 686382

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4085-1809>

AuthorID (SCOPUS): 686382

e-mail: Sergey7-2005@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 author did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 17.08.2026; approved after reviewing 01.09.2026; accepted for publication 18.09.2026.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ПЕРЕКРЫТИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОКОН ПРЯМОЗУБОГО РОТОРНОГО НАСОСА

Е. А. Павлюченко , А. С. Павлюченко, А. А. Прусов

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

 hystonru@mail.ru

Объектом исследования является рабочий процесс прямозубого роторного насоса в период частичного перекрытия всасывающего и нагнетательного окон зубом ротора. Цель работы состоит в уточнении математического описания изменения мгновенного давления жидкости в рабочей камере с учетом переменной площади проходного сечения распределительных окон.

Модель основана на совместном использовании уравнений Бернулли и непрерывности зависимостей для определения потерь напора по длине и местных гидравлических сопротивлений, а также геометрических соотношений для площади кругового сегмента, формирующегося при частичном перекрытии окна. Получены зависимости, связывающие угол поворота ротора, положение зуба относительно окна, величину открытого проходного сечения и коэффициент местного сопротивления.

Разработан расчетный подход, позволяющий учитывать непрерывное изменение площади всасывающего и нагнетательного окон в процессе движения зуба. Полученные аналитические зависимости обеспечивают возможность определения изменения гидравлического сопротивления и потерь напора в зависимости от углового положения ротора и геометрических параметров насоса. Это позволяет выявлять положения рабочего органа, при которых гидравлические потери возрастают наиболее существенно, и более точно рассчитывать изменение давления в рабочей полости.

Учет реального процесса перекрытия распределительных окон устраняет допущение об их мгновенном открытии и закрытии и повышает точность математической модели. Предложенный метод может применяться при выборе формы зуба, размеров и конфигурации окон, а также при проектировании других объемных гидромашин с аналогичным принципом управления потоком. Дальнейшее развитие модели связано с экспериментальной проверкой, учетом сжимаемости жидкости и кавитационных явлений.

Ключевые слова: прямозубый роторный насос, математическая модель, рабочие процессы, окна нагнетания и всасывания, распределительные окна, гидравлические потери, давление в рабочей камере

Для цитирования: Павлюченко Е. А., Павлюченко А. С., Прусов А. А. Математическое моделирование течения жидкости при перекрытии распределительных окон прямозубого роторного насоса. Омский научный вестник. 2026. № 3 (199). С. 39–45. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-39-45>. EDN: CQNOIP.



© Павлюченко Е. А., Павлюченко А. С., Прусов А. А., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATHEMATICAL MODELING OF FLUID FLOW DURING THE CLOSURE OF DISTRIBUTION PORTS IN A STRAIGHT-TOOTH ROTARY PUMP

E. A. Pavlyuchenko✉, A. S. Pavlyuchenko, A. A. Prusov

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

✉ hystonru@mail.ru

The study examines transient flow in a straight-tooth rotary pump when a rotor tooth progressively covers the suction and discharge ports. The aim is to improve prediction of instantaneous pressure in the working chamber by representing the actual variation in the open flow area instead of assuming instantaneous port closure.

The formulation combines the Bernoulli and continuity equations with relations for frictional and local hydraulic losses. The changing port area is described as a circular segment whose dimensions depend on rotor position. The authors establish analytical relations between rotor angle, tooth position, effective flow area and the corresponding local resistance coefficient.

Moreover, the research presents a calculation procedure that continuously accounts for changes in the suction and discharge flow areas during tooth passage. The derived expressions allow determining how hydraulic resistance and head losses vary with rotor position and pump geometry. Therefore, the model identifies angular regions associated with the greatest additional losses and provides a more detailed estimate of pressure variation within the working chamber.

Explicit representation of partial port closure removes a simplifying assumption used in earlier models and improves the physical description of the transient process. The method can support optimization of tooth geometry and port dimensions and can be adapted to other positive-displacement hydraulic machines in which flow is controlled by moving elements. Further development should include experimental validation over a wider operating range and extensions accounting for liquid compressibility and cavitation.

Keywords: straight-tooth rotary pump, mathematical model, operating processes, discharge and suction windows, distribution windows, hydraulic losses, pressure in the working chamber

For citation: Pavlyuchenko E. A., Pavlyuchenko A. S., Prusov A. A. Mathematical modeling of fluid flow during the closure of distribution ports in a straight-tooth rotary pump. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):39-45. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-39-45>. EDN: CQNOIP. (In Russ.).



© Pavlyuchenko E. A., Pavlyuchenko A. S., Prusov A. A., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Несмотря на то, что история создания гидравлических насосов насчитывает более двух тысячелетий, постоянно происходит совершенствование их конструкций с целью снижения затрат на сжатие и перемещение жидкостей и улучшения других важных для потребителя характеристик [1].

В работе [2] был предложен роторный прямозубый насос, к достоинствам которого относятся простота конструкции рабочих органов, возможность перекачивать вязкие и сильно загрязнённые жидкости. В исследованиях этой конструкции авторами были предложены математические модели, в которых делалось допущение о том, что проход зуба мимо нагнетательного и всасывающего окна происходит «мгновенно» и не оказывает влияния на процессы, протекающие в полостях насоса [3, 4]. Сравнение результатов моделирования и экспериментов показало, что данное допущение даёт удовлетворительные результаты в том случае, когда в линии нагнетания присутствует обратный клапан или гидродiode с достаточно высокой диодностью [5].

В то же время при проведении экспериментов был установлен факт работоспособности насоса и без каких-либо устройств, установленных в линии

нагнетания, тормозящих обратный поток жидкости [6]. Данное условие может быть полезно при работе насоса с сильно загрязнёнными жидкостями или для применения насоса в пищевой промышленности. В этом случае, при равном сечении окон всасывания, нагнетания и сечения рабочей камеры с трубопроводами, проходное сечение для течения жидкости не зависит от динамики обратного клапана, а полностью соответствует мгновенному сечению всасывающего и нагнетательного окон, что особенно актуально при прохождении зуба ротора через всасывающее и нагнетательное окно.

Анализ литературных источников показал, что в работе [7] авторы рассматривают изменение проходного сечения распределителя аксиально-поршневого насоса при изменении угла поворота вала и делают выводы о влиянии формы щели на давление в рабочей камере насоса. Авторы работы [8] исследовали конструктивные параметры проточных частей распределительной системы с целью улучшения выходных характеристик планетарного гидромотора, где рассматривали влияние изменения площади проходного сечения на давление в полости распределительной системы. В работе [9] предлагается конструкция жидкостно-кольцевого вакуумного насоса с регулируемым окном нагнетания,

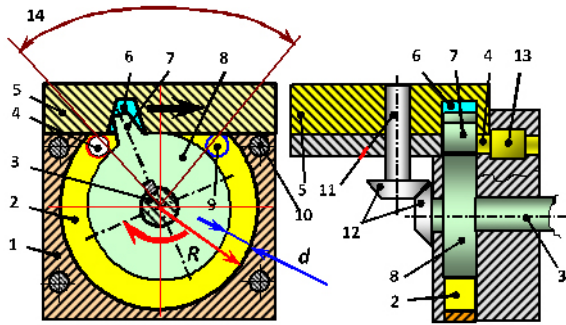


Рис. 1. Схема прямозубого роторного насоса:
1 — корпус; 2 — рабочая камера; 3 — ведущий вал;
4 — окно нагнетания; 5 — уплотнительный диск;
6 — впадина; 7 — зуб; 8 — ротор; 9 — всасывающее окно;
10 — стяжные болты; 11 — ведомый вал;
12 — синхронизирующие шестерни; 13 — линия нагнетания; 14 — мёртвая зона; R — радиус цилиндра;
 d — высота рабочей камеры ($d = 2r$, где r — радиус окон) [2]
Fig. 1. Diagram of a straight-tooth rotary pump: 1 — housing;
2 — working chamber; 3 — drive shaft; 4 — discharge window;
5 — sealing disc; 6 — cavity; 7 — tooth; 8 — rotor;
9 — suction window; 10 — clamping bolts; 11 — driven shaft;
12 — synchronizing gears; 13 — discharge line;
14 — dead zone; R — cylinder radius; d — working chamber height ($d = 2r$, where r — distribution port's radius) [2]

что обеспечивает высокий кавитационный запас в различных режимах его работы. Численное моделирование течения в каналах роторного насоса, подтвердившее значимость геометрии проточной части, выполнено в работе [10].

В результате анализа рассмотренных работ была сформулирована цель исследования — уточнение математической модели прямозубого роторного насоса путём включения в неё детального описания процесса перекрытия окон всасывания и нагнетания зубом ротора.

Материалы и методы

На рис. 1 показана схема прямозубого роторного насоса. Рассмотрим принцип ее работы: при вращении приводного вала 3 ротор 8 перемещается внутри рабочей камеры 2. Зуб 7 выполняет функцию вытеснителя и разделяет камеру на полости всасывания и нагнетания. За движущимся зубом объём рабочей полости увеличивается, давление снижается, и жидкость поступает через всасывающее окно 9. Перед зубом объём полости уменьшается, вследствие чего давление жидкости возрастает, и она вытесняется через нагнетательное окно 4 в линию нагнетания 13.

Для прохождения зуба через зону сопряжения рабочих органов предусмотрен синхронно вращающийся уплотнительный диск 5 с впадиной 6. В определённый момент зуб входит во впадину и вместе с диском проходит мёртвую зону 14, отделяющую полость высокого давления от всасывающей полости. Установленный в линии нагнетания самодельствующий обратный клапан (на рисунке не показан) открывается при превышении давления в рабочей камере над давлением в трубопроводе и предотвращает обратное движение жидкости (вместо обратного клапана может быть установлен гидродиод). После выхода зуба из мёртвой зоны рабочий цикл повторяется.

Как отмечалось ранее, существующие математические модели прямозубого роторного насоса не учитывают перекрытия окон всасывания и на-

гнетания зубом ротора. Для описания этого явления существующая математическая модель рабочих процессов насоса должна быть дополнена уравнениями течения жидкости через всасывающее и нагнетательное окна в процессе прохождения мимо них зуба ротора.

Для нахождения мгновенных давлений и скоростей в сечениях нагнетательного и всасывающего окна необходимо воспользоваться уравнением Бернулли и уравнением неразрывности для двух сечений потока жидкости в окнах нагнетания и всасывания [11, 12]. Применительно к рассматриваемой конструкции получим для процесса нагнетания:

$$p_n = \frac{v_c^2 \rho}{2} + p_{\text{наг}} - \rho g(z_1 - z_2) + \Delta h, \quad (1)$$

для процесса всасывания:

$$p_{\text{вс}} = \frac{v_c^2 \rho}{2} + p_{\text{атм}} - \rho g(z_1 - z_2) + \Delta h, \quad (2)$$

где p_n — давление в полости нагнетания; $p_{\text{вс}}$ — давление в полости всасывания; $p_{\text{наг}}$ — давление в линии нагнетания; $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; z_1, z_2 — геометрическая высота центров тяжести сечений; Δh — потери напора; ρ — плотность жидкости; v_c — средняя скорость течения жидкости, равная скорости вращения ротора; g — ускорение свободного падения.

Потери напора Δh можно найти по формуле Вейсбаха:

$$\Delta h = (\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n) \frac{v_c^2}{2g}, \quad (3)$$

где ξ_i — коэффициент потерь напора (вычисляется отдельно для каждого сопротивления от 1 до n); n — количество местных сопротивлений, расположенных между рассматриваемыми сечениями.

Таким образом, общие потери напора Δh определяются как сумма потерь напора на каждом сопротивлении:

$$\Delta h = h_1 + h_2 + \dots + h_n. \quad (4)$$

Основные потери при работе насоса — это потери на гидравлическое трение по длине. Согласно работе [13], потери напора $h_{\text{тр}}$ на преодоление сопротивления трения по длине L_K в рабочих полостях насоса можно рассчитать по формуле Дарси — Вейсбаха:

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{v_c^2}{2g} \frac{L_K}{D}, \quad (5)$$

где λ — коэффициент потерь на трение, который определяется для гладких жёстких трубопроводов при ламинарном течении зависимостью $\lambda = 64/Re$, а для гибких труб $\lambda = 96/Re$; для турбулентного течения и Re в пределах от критического значения до $Re = 10^5$ используют формулу Блазиуса $\lambda = 0,3164/Re^{0,25}$; для больших Re (более 10^4) применяют формулу Горшкова — Кантакузена $\lambda = 0,16/Re^{0,19}$; Re — число Рейнольдса; D — характерный диаметр сечения [14, 15].

В случае если сечение рабочей камеры больше, чем сечение всасывающего и нагнетательного трубопроводов, к потерям напора по длине добавляю-

ся потери при внезапном расширении (когда жидкость поступает из всасывающего трубопровода в рабочую камеру) и при внезапном сужении (когда жидкость поступает из рабочей камеры в нагнетательный трубопровод). Потери при внезапном расширении рассчитываются по формуле:

$$h_{\text{вн.р}} = \xi_{\text{вн.р}} \frac{v_c^2}{2g}, \quad (6)$$

где $\xi_{\text{вн.р}}$ — коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении, определяемый по формуле Борда — Карно $\xi_{\text{вн.р}} = (S/S_2 - 1)^2$; S и S_2 — площади сечений рабочей камеры и всасывающего трубопровода соответственно [16].

Потери напора при внезапном сужении рассчитываются по формуле:

$$h_{\text{вн.с}} = \xi_{\text{вн.с}} \frac{v_c^2}{2g}, \quad (7)$$

где $\xi_{\text{вн.с}}$ — коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении.

Коэффициент местного сопротивления при попадании жидкости из рабочей камеры в нагнетательный трубопровод определяется по формуле Борда — Идельчика [17]:

$$\xi_{\text{вн.с}} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_2}{S}\right), \quad (8)$$

где S и S_2 — площади сечений рабочей камеры и нагнетательного трубопровода соответственно.

При вращении ротора зуб осуществляет перекрытие окон всасывания и нагнетания, при этом возникают дополнительные потери напора движущейся жидкости $h_{\text{п.о}} = \xi_{\text{п.о}} v_c^2 / (2g)$, где $\xi_{\text{п.о}}$ — коэффициент местного сопротивления при перекрытии окна.

Найдём потери напора при протекании жидкости через частично перекрытое окно. Исходными данными в расчётах являются радиус рабочей камеры R (сумма радиуса ротора и высоты зуба), радиус окна r и угол поворота ротора β_1 (рис. 2).

На рис. 2 представлена схема перекрытия окна зубом насоса в том случае, если окно представляет собой окружность, вписанную в высоту рабочей полости. Из рис. 2а видно, что при вращении ротора и прохождении зуба в зоне окна, имеющего радиус r , проходное сечение окна представляет собой сегмент.

При изменении угла положения зуба β этот сегмент поворачивается относительно центра вращения ротора (точка O), и происходит изменение длины хорды и площади проходного сечения окна, но при этом в сечении всегда будет сохраняться вид фигуры в форме сегмента (рис. 2б).

Так как площадь поперечного сечения канала для прохода жидкости при перемещении по окну зуба ротора переменная, то мгновенная площадь поперечного сечения канала через окно S_k вычисляется по формуле:

$$S_k = S_{\text{ок}} - S_3, \quad (9)$$

где S_3 — площадь сегмента, перекрываемого зубом; $S_{\text{ок}} = \pi r^2$ — площадь окна.

В том случае, когда $\alpha_1 \leq 180^\circ$, площадь сегмента S_3 рассчитывается по формуле:

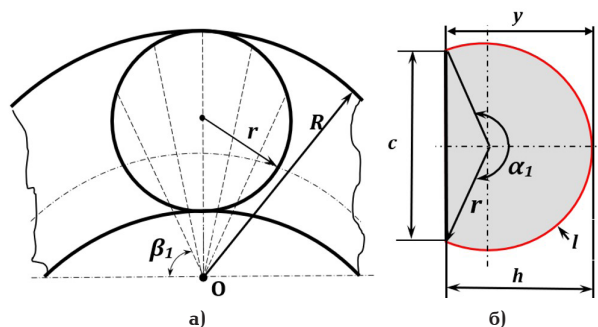


Рис. 2. Схема перекрытия окна рабочим органом насоса (а) и площадь проходного сечения окна (б)

Fig. 2. Scheme of the window being covered by the pump's working element (a) and the area of the distribution port's flow section (b)

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

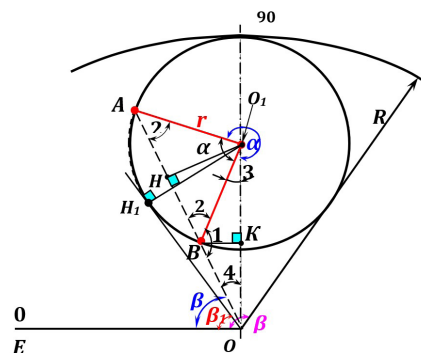


Рис. 3. Определение угла сегмента α
Fig. 3. Determining the angle of the α segment

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

$$S_3 = \frac{1}{2} r^2 \left(\alpha_1 \frac{\pi}{180^\circ} - \sin \alpha_1 \right), \quad (10)$$

где r — радиус окружности окна; α_1 — угол сегмента (в градусах).

В том случае, когда $\alpha_1 > 180^\circ$:

$$S_3 = \frac{1}{2} r^2 \left((360^\circ - \alpha_1) \frac{\pi}{180^\circ} + \sin \alpha_1 \right). \quad (11)$$

В процессе математического моделирования необходимо вычислить значение угла β_1 (рис. 3), устанавливающего взаимосвязь угла поворота ротора относительно выбранной базовой точки E , соответствующей 0° . Рассмотрим случай, когда OE перпендикулярна вертикальной оси, проходящей через центр окна, причём точка O лежит на этой оси на расстоянии R от дуги CD . Тогда угол β_1 — угол, на котором зуб начинает взаимодействие с окном.

Очевидно, что данный угол зависит от радиуса рабочей камеры и радиуса окна:

$$\beta_1 = 90^\circ - \arcsin \left(\frac{r}{R - r} \right), \quad (12)$$

$$\beta_0 = 180^\circ - \beta_1, \quad (13)$$

где β_0 — угол окончания взаимодействия зуба и окна.

Однако в определении площади сегмента, образованного при частичном перекрытии зубом окна, остаётся важный вопрос о взаимосвязи углов α и β , для рассмотрения которого следует вновь обратиться к рис. 3, из которого видно, что

$$\alpha = 360^\circ - \alpha_1. \quad (14)$$

Из треугольника O_1BO видно, что $BO_1^2 = OB^2 + OO_1^2 - 2 \cdot OB \cdot OO_1 \cdot \cos 4$. С учётом $BO_1 = r$, $OO_1 = R - r$, $\cos 4 = \cos(90^\circ - \beta)$, получим:

$$OB_2 - 2(R - r)\cos(90^\circ - \beta) \cdot OB + (R - r)^2 - r^2 = 0. \quad (15)$$

Откуда, решая квадратное уравнение:

$$OB = \frac{2(R - r)\cos(90^\circ - \beta) \pm \sqrt{4(R - r)^2 \cos^2(90^\circ - \beta) + 4(r^2 - (R - r)^2)}}{2}. \quad (16)$$

Видно, что дискриминант будет положителен только при $\beta_1 \leq \beta \leq 90^\circ$, что является непосред-

ственным условием использования данного выражения.

Так как $R \gg r$, тогда значение OB , для вычисления которого будет вычитаться корень из дискриминанта, будет отрицательным, что невозможно, т. к. длина отрицательной быть не может. Таким образом, для определения длины OB требуется складывать слагаемые в числителе. Тогда

$$OB = (R - r) \left(\cos(90^\circ - \beta) + \sqrt{\cos^2(90^\circ - \beta) + \frac{r^2}{(R - r)^2} - 1} \right). \quad (17)$$

Из треугольника OBK с учётом (17) видно, что

$$BK = \sin(90^\circ - \beta) \times (R - r) \left(\cos(90^\circ - \beta) + \sqrt{\cos^2(90^\circ - \beta) + \frac{r^2}{(R - r)^2} - 1} \right). \quad (18)$$

Так как $\alpha_1 = 2(90^\circ - \arcsin(BK/r))$, то, с использованием формулы (18), можно получить следующее уравнение:

$$\alpha_1 = 2 \left(90^\circ - \arcsin \left(\frac{\sin(90^\circ - \beta) \cdot (R - r) \left(\cos(90^\circ - \beta) + \sqrt{\cos^2(90^\circ - \beta) + \frac{r^2}{(R - r)^2} - 1} \right)}{r} \right) \right). \quad (19)$$

Уравнение для вычисления приближённого значения коэффициента местного сопротивления (потери) на перекрытие окна $\xi_{п.о}$ от угла его раскрытия y/D ($D = 2R$, рис. 2) выражается формулой [13]:

$$\xi_{п.о} = 138458 \left(\frac{y}{D} \right)^6 - 453092 \left(\frac{y}{D} \right)^5 + 576901 \left(\frac{y}{D} \right)^4 - 360691 \left(\frac{y}{D} \right)^3 + 114832 \left(\frac{y}{D} \right)^2 - 17399 \left(\frac{y}{D} \right) + 991,24. \quad (20)$$

Значению y соответствует высота сегмента h , определяемая по формуле:

$h = r(1 - \cos(\alpha_1/2))$ и выраженная через угол α : $y = r \cos(\alpha_1/2) + r$, или $y = r(1 - \cos(\alpha/2))$. Тогда:

$$\frac{y}{D} = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\alpha_1}{2} \right) \text{ или } \frac{y}{D} = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (21)$$

Определив по формуле (19) угол α_1 или по формуле (14) угол α и величину y/D по формуле (21), выражение (20) можно представить в виде уравнения:

$$\xi_{п.о} = 138458 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right)^6 - 453092 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right)^5 + 576901 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right)^4 - 360691 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right)^3 + 114832 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right)^2 - 17399 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right) + 991,24. \quad (22)$$

Результаты

Использование описанного метода позволяет уточнить расчёты течения жидкости не только

в прямозубых насосах, но и во всех агрегатах, где потоки регулируются путём их перекрытия подвижными элементами, кинематически связанными с вращением рабочего органа, с учётом возможных особенностей формы окон и вытеснителя.

Полученные аналитические зависимости (19) и (22) дают возможность количественно оценить изменение гидравлического сопротивления в зависимости от угла поворота ротора и геометрических параметров насоса. На основе этих выражений можно построить графики изменения коэффициента местного сопротивления и потерь напора в процессе перекрытия окна, что позволяет выявить наиболее неблагоприятные с точки зрения гидравлических потерь положения зуба.

Разработанный метод расчёта процесса перекрытия зубом нагнетательного и всасывающего окна в прямозубом насосе позволяет более точно рассматривать процесс изменения давления нагнетаемой жидкости в рабочей полости насоса. Уточнённая математическая модель может использоваться при проектировании, в том числе в части оптимизации формы зуба и нагнетательного окна. Разработанный метод расчёта может использоваться при проектировании аналогичных по конструкции агрегатов.

Заключение

Рассмотрена возможность геометрического моделирования ассоциированных множеств, то есть множеств, элементы одного из которых зависят от всех или некоторых элементов другого множества. Геометрическая модель получается многомерной, и ассоциированность множеств выражается системами взаимосвязанных уравнений.

Предложен алгоритм построения однопараметрического семейства множеств взаимно связанных

кривых, удовлетворяющих соответствующим множествам граничных условий. Оставленный свободным параметр служит для организации итерационного процесса приближения построенных кривых к соответствующим граничным условиям. Форма кривых определяется структурой аппроксимирующей функции и значениями числовых коэффициентов.

Рассмотрен практический пример применения описанного подхода. Он заключается в построении прогнозирующей геометрической модели изменения формы трехслойного тканевого пакета, находящегося под воздействием внешней силы. Свободный параметр имитирует суммарную жесткость пакета. Указанный подход возможен для численного моделирования многослойных пакетов, но этот вопрос оставлен для следующих публикаций, как и вопрос о суммарной жесткости пакета.

Финансирование / Funding

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25–29–20146 (<https://rscf.ru/project/25-29-20146/>) и гранта Омской области.

The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 25–29–20146 (<https://rscf.ru/project/25-29-20146/>) and the Omsk Region grant.

Список источников / References

1. Шейпак А. А. История создания насосов и механика жидкости (посвящается столетию кафедры Э10 МГТУ им. Н. Э. Баумана) // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. № 5. С. 1–18. EDN: UBXQYZ.
2. Sheypak A. A. Istoriya sozdaniya nasosov i mekhanika zhidkosti (posvyashchayetsya stoletiyu kafedry E10 MGTU im. N. E. Bauman). *Nauka i Obrazovaniye: Nauchnoye Izdaniye MGTU im. N. E. Bauman*. 2015;5:1–18. EDN: UBXQYZ. (In Russ.).
3. Григорьев А. В., Щерба В. Е., Болштынский А. П. Проектирование прямозубого роторного насоса // Омский научный вестник. 2010. № 3 (93). С. 81–84. EDN: OFSNLD.
4. Grigoriev A. V., Scherba V. E., Bolshtyanskiy A. P. Design of straight tooth rotary pump. *Omsk Scientific Bulletin*. 2010;3(93):81–84. EDN: OFSNLD. (In Russ.).
5. Григорьев А. В., Щерба В. Е., Болштынский А. П. Математическое моделирование рабочих процессов прямозубого бицилиндрического насоса // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 2. С. 26–30. EDN: RXANMX.
6. Grigor'yev A. V., Shcherba V. E., Bolshtyanskiy A. P. Matematicheskoye modelirovaniye rabochikh protsessov pryamozubogo bitsilindricheskogo nasosa. *Khimicheskoye i Neftegazovoye Mashinostroyeniye*. 2015;2:26–30. EDN: RXANMX. (In Russ.).
7. Кайгородов С. Ю., Кузнецов Н. Е., Забровский В. Л. Разработка методики расчёта силы инерции жидкости в математической модели прямозубого роторного насоса // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2025. Т. 9, № 3. С. 14–21. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2025-9-3-14-21>. EDN: BDLWZI.
8. Kaigorodov S. Yu., Kuznetsov N. E., Zabrovskiy V. L. Development of a method for calculating the fluid inertia force in the mathematical model of a straight-line rotary pump. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025;3(9):14–21. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2025-9-3-14-21>. EDN: BDLWZI. (In Russ.).
9. Кайгородов С. Ю. Экспериментальное подтверждение возможности применения гидравлического диода в линии нагнетания прямозубого роторного насоса // Вестник машиностроения. 2020. № 4. С. 56–58. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-4-56-58>. EDN: JHBOQF.

Kaygorodov S. Yu. Experimental confirmation of the possibility of using a hydraulic diode in the discharge line of a spur rotary pump. *Vestnik Mashinostroyeniya*. 2020;4:56–58. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-4-56-58>. EDN: JHBOQF. (In Russ.).

6. Григорьев А. В., Нестеренко Г. А. Особенности проектирования прямозубого бесклапанного насоса // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. № 12. С. 30–33. EDN: SKEOWT.
7. Grigor'yev A. V., Nesterenko G. A. Osobennosti proyektirovaniya pryamozubogo besklapannogo nasosa. *Khimicheskoye i Neftegazovoye Mashinostroyeniye*. 2019;12:30–33. EDN: SKEOWT. (In Russ.).
8. Wang D., Chen C., Dong H. Investigation of the Pressure Fluctuation of Piston Chambers with Variable Slot Geometry. *Machines*. 2023;11(2):225. <https://doi.org/10.3390/machines11020225>. EDN: RUYBML.
9. Panchenko A., Voloshina A., Boltyansky O. [et al.]. Designing the flow-through parts of distribution systems for the PRG series planetary hydraulic motors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018;3(1):67–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132504>. EDN: YASIPB.
10. Rodionov Yu. V., Selivanov Yu. T., Nikitin D. V. [et al.]. Design of Liquid-Ring Vacuum Pump with Adjustable Degree of Internal Compression. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021;57:477–483. <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00962-5>. EDN: IEAPJM.
11. Kovačević A., Rane S. Challenges in 3D CFD Modelling of Rotary Positive Displacement Machines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1909:012063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1909/1/012063>.
12. Щерба В. Е., Шалай В. В., Григорьев А. В. [и др.]. Анализ влияния длин щелевого уплотнения ступенчатого вида на рабочие процессы и энергетические характеристики поршневой гибридной энергетической машины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 5. С. 44–51. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-5-44-51>. EDN: URISPL.
13. Shcherba V. E., Shalai V. V., Grigoriev A. V. [et al.]. An analysis of influence of the lengths of stepped slot seals on working processes and power characteristics of piston hybrid power machines. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2018;5:44–51. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-5-44-51>. EDN: URISPL.
14. Григорьев А. В. Конструкция и основы расчёта прямозубого роторного насоса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2011. 21 с. EDN: QHOOIP.
15. Grigor'yev A. V. Konstruktsiya i osnovy rascheta pryamozubogo rotornogo nasosa. Omsk, 2011. 21 p. EDN: QHOOIP. (In Russ.).
16. Crane Co. Flow of Fluids Through Valves, Pipes, Pumps and Fittings: Technical Paper No. 410. Crane Process Flow Technologies, 2022. 288 p.
17. Черкасских С. Н., Феденков В. В. Расчёт утечек жидкости в гидромашине перистальтического действия // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 4. С. 289–298. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-643454>. EDN: SLZQDB.
18. Cherkasskikh S. N., Fedenkov V. V. The calculation of fluid leaks in the peristaltic hydraulic machine. *Izvestia MGTU MAMI*. 2024;18(4):289–298. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-643454>. EDN: SLZQDB. (In Russ.).
19. Китаев Д. Н. Верификация моделей расчета коэффициента гидравлического трения в водяных тепловых сетях // Научный журнал строительства и архитектуры. 2025. № 3 (79). С. 39–49. <https://doi.org/10.36622/2541-7592.2025.79.3.004>. EDN: UXVDLK.
20. Kitaev D. N. Verification of models for calculating the hydraulic friction coefficient in water heat networks. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2025;3(79):39–49. <https://doi.org/10.36622/2541-7592.2025.79.3.004>. EDN: UXVDLK. (In Russ.).
21. Дербичев В. С., Иншаков Р. С., Роман К. С. [и др.]. Уточнение коэффициентов местного сопротивления для ги-

гидравлического расчета газопроводов // Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11, № 3. С. 33. EDN: VYKVMH.

Derbichev V. S., Inshakov R. S., Roman K. S. [et al.]. Refinement of local resistance coefficients for hydraulic calculation of gas pipelines. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019;11(3):33. EDN: VYKVMH. (In Russ.).

17. Кондратьев А. С., Огородник К. Ф., Фриха М. О расчете коэффициента местного гидравлического сопротивления диафрагм в переходной и ламинарной областях течения // Известия МГТУ «МAMI». 2021. Т. 15, № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-47-1-32-37>. EDN: RONOZS.

Kondratyev A. S., Ogorodnik K. F., Frikha M. Calculation of the coefficient of local hydraulic diaphragm resistance in transitional and laminar areas of flow. *Izvestia MGTU MAMI*. 2021;15(1):32–37. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-47-1-32-37>. EDN: RONOZS. (In Russ.).

Вклад авторов:

Е. А. Павлюченко. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, разработка математической модели течения жидкости при перекрытии распределительных окон прямозубого роторного насоса, вывод аналитических зависимостей для площади проходного сечения окна и коэффициента местного сопротивления, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

А. С. Павлюченко. Проведение обзора литературных источников, обоснование допущений математической модели, вывод геометрических соотношений для угла сегмента и площади перекрытия окна, разработка расчётного подхода, анализ результатов моделирования, подготовка текста статьи.

А. А. Прусов. Постановка задач исследования, анализ конструкции прямозубого роторного насоса, интерпретация результатов расчётов гидравлических потерь и изменения давления в рабочей камере, оценка адекватности предложенной модели, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

Authors' contribution:

Evgeny A. Pavlyuchenko. Formulation of the research goal and objectives, analysis of the issue, development of a mathematical model of fluid flow when closing distribution windows of a straight-tooth rotary pump, derivation of analytical dependencies for the area of the passage section of the port and the coefficient of local resistance, formulation of conclusions, preparation of the text of the article.

Aleksandra S. Pavlyuchenko. Conducting a review of literary sources, substantiating the assumptions of the mathematical model, deducing geometric relationships for the segment angle and the overlap area of the port, developing a computational approach, analysing modeling results, preparing the text of the article.

Aleksander A. Prusov. Formulation of the research objectives, analysis of the design of a straight-tooth rotary pump, interpretation of the results of calculations of hydraulic losses and pressure changes in the working chamber, assessment of the adequacy of the proposed model, formulation of conclusions, preparation of the text of the article.

Информация об авторах:

ПАВЛЮЧЕНКО Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» Омского госу-

дарственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6223-7909

AuthorID (РИНЦ): 644122

AuthorID (SCOPUS): 55956907000

ResearcherID: N-4395-2013

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6109-7449>

e-mail: hystonru@mail.ru

ПАВЛЮЧЕНКО Александра Сергеевна, ассистент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1275-0803

AuthorID (РИНЦ): 1325466

e-mail: sanjaomsk@mail.ru

ПРУСОВ Александр Александрович, аспирант кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» ОмГТУ, г. Омск.

e-mail: rudel.alexander@yandex.ru

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

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 19.08.2026; одобрена после рецензирования 14.09.2026; принята к публикации 16.09.2026.

Information about the authors:

PAVLYUCHENKO Evgeny Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 6223-7909

AuthorID (RSCI): 644122

AuthorID (SCOPUS): 55956907000

ResearcherID: N-4395-2013

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6109-7449>

e-mail: hystonru@mail.ru

PAVLYUCHENKO Aleksandra Sergeevna, Assistant of the Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 1275-0803

AuthorID (RSCI): 1325466

e-mail: sanjaomsk@mail.ru

PRUSOV Aleksander Aleksandrovich, Graduate Student of the Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University, Omsk.

e-mail: rudel.alexander@yandex.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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 19.08.2026; approved after reviewing 14.09.2026; accepted for publication 16.09.2026.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОНТРМАТРИЦ ДЛЯ ХОЛОДНОГО КОНГРЕВНОГО ТИСНЕНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

М. С. Феддер 

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

 maryfedder@gmail.com

Проанализированы общие тенденции в развитии производственных подходов с точки зрения термина Индустрия 4.0. В рамках полиграфической отрасли рассмотрены возможности и ограничения применимых методов организации производства и интеграции новых цифровых технологий. Выявлено, что полиграфическая отрасль сталкивается с конкуренцией, дорогим сырьём и зависимостью от импортного оборудования. Предприятиям требуется повышение производительности, снижение потерь и формирование интеллектуальной собственности как основы конкурентоспособности.

Проведено исследование на предмет возможности изготовления контрматриц для холодного конгревного тиснения методом 3D-прототипирования. Проанализированы возможности аддитивных технологий в области изготовления прессовых пар, в частности ответных частей — контрштампов. Выбрана технология Fused Deposition Modeling — формирование объекта методом послойного наплавления для первичного прототипирования и печати тест-объектов, а также первичных тест-объектов на соответствие группы критериев качества контрматриц.

Проверены параметры воспроизведения линейных размеров отдельных элементов с использованием материалов ABS и PLA в сравнении с входными данными о геометрии. Получено подтверждение на входном контроле контрматриц к промышленным испытаниям на предприятии.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-прототипирование, холодное конгревное тиснение, постпечатная обработка оттисков, матрица, контрматрица, клише

Для цитирования: Феддер М. С. Критерии оценки качества контрматриц для холодного конгревного тиснения, изготовленных с применением аддитивных технологий. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 46–55. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-46-55>. EDN: RSOMYU.



© Феддер М. С., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

CRITERIA FOR ASSESSING THE QUALITY OF ADDITIVELY MANUFACTURED COUNTER-MATRICES FOR COLD EMBOSING

М. S. Fedder 

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Bolshaya Morskaya St., 18, Saint Petersburg, 191186, Russia

 maryfedder@gmail.com

The article examines general trends in production approaches within the framework of the Industry 4.0, focusing on the printing industry. The analysis highlights the opportunities and constraints of integrating digital technologies into existing manufacturing systems. Findings indicate that the sector contends with high raw material costs, reliance on imported machinery and intense market competition. To ensure competitiveness, enterprises should boost productivity, minimize waste and develop their own intellectual property portfolios.

The author conducts the research on the feasibility of manufacturing counter-matrices for cold embossing using 3D prototyping. The capabilities of additive technologies in the production of die sets — specifically counter-dies — are analysed. Fused Deposition Modeling (FDM), a layer-by-layer deposition technique,

is selected for initial prototyping and printing of test objects to evaluate them with a set of quality criteria for counter-matrices.

Moreover, the parameters for reproducing the linear dimensions of individual elements are verified using ABS and PLA materials compared with input geometric data. Therefore, the author confirms the compliance with acceptance criteria for industrial trials at an enterprise facility during the incoming inspection of the counter-matrices.

Keywords: additive technologies, 3D prototyping, cold embossing, post-press processing, matrix, counter-matrix, cliché

For citation: Fedder M. S. Criteria for assessing the quality of additively manufactured counter-matrices for cold embossing. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):46–55. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-46-55>. EDN: RSOMYU. (In Russ.).



© Fedder M. S., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Стремительное развитие информационных технологий, киберфизических систем и анализа больших данных знаменует переход к концепции «Индустрия 4.0» [1]. Применительно к производству полиграфической оснастки, такой как контрматрицы для холодного конгревного тиснения, подход «Индустрия 4.0» подразумевает переход от традиционных технологий производства к применению аддитивных технологий и прямому цифровому производству на основе электронных геометрических моделей [2].

Сталкиваясь с проблемой давления иностранных полиграфических компаний в ценообразовании, высокой стоимостью на запечатываемые и расходные материалы, а также с отсутствием отечественных альтернатив в оборудовании и технологической оснастке, полиграфическая промышленность должна выработать стратегию по стабилизации и устойчивому развитию [3]. Помимо экономической эффективности и рядового технологического развития с целью обеспечения конкурентоспособности необходимо формировать и поддерживать внедрение инновационных технологий [4].

В полиграфии важное значение имеет продукция с послепечатной отделкой, которая делает исполнение дорогим и неповторимым, притягательным и запоминающимся. Такая продукция имеет большую маржинальность, а типографии стремятся пополнить портфель заказов такими проектами. Один из популярных способов отделки полиграфической продукции, при котором элементы дизайна имеют видимый и осязаемый рельеф, — это холодное конгревное тиснение.

Предприятия, которые готовят оснащение полиграфического оборудования для проведения такого послепечатного процесса, рассматривают различные способы сокращения ошибок проектирования и разработки, рационализации производственных процессов, устранения потерь, а также исследуют возможности применения новых технологий производства, материалов и оборудования, что и поощряет последняя промышленная революция «Индустрия 4.0» [5]. Аддитивное производство считается важным компонентом этого нового механизма [6].

Аддитивные технологии прошли длинный путь от процессов быстрого прототипирования (Rapid prototyping) до прямого цифрового производства (Direct digital manufacturing) [7], которое позволяет создавать физические объекты на основе геометрического представления (цифровой модели)

путем последовательного добавления материала. В соответствии с ГОСТом аддитивный технологический процесс (additive manufacturing) — процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства [8].

Сегодня российский рынок аддитивного производства или 3D-печати (оборудование, программное обеспечение, материалы, поставки, производство по запросу) вырос на 33,9 % с 2021 по 2022 г. в стоимостном выражении и на 60,1 % с 2022 по 2023 г. Наблюдается развитие и распространение лучших практик в использовании аддитивных технологий в таких отраслях, как медицина и стоматология, литейное производство, авиация, общее машиностроение, индустрия пластмасс [9].

Лидеры рынка полимерной 3D-печати сосредоточены на развитии решений в производстве прототипов и оснастки. Интеграция аддитивных технологий в послепечатные полиграфические процессы имеет актуальность и новизну для развития на российском рынке, благодаря таким преимуществам, как экологичность, автономность работы, стабильность качества продукции, минимизация отходов, экономия ресурсов и снижение затрат, энергоэффективность [10].

При рассмотрении возможности применения аддитивных технологий для изготовления контрматриц выявляются технологические ограничения, связанные с особенностями формирования слоистой структуры, анизотропией физико-механических свойств, усадочными деформациями, недостаточной износостойкостью и вариацией качества поверхности в зависимости от технологии печати и последующей постобработки.

В связи с чем возникает необходимость систематизации и формирования критериев оценки качества контрматриц, изготовленных методом 3D-печати, с учетом специфики их применения в процессе холодного конгревного тиснения. Такие критерии должны отражать не только геометрическую точность и качество поверхности, но и устойчивость к циклическим контактным нагрузкам, сохранение формы рельефа, стабильность размеров в процессе эксплуатации, а также способность обеспечивать требуемую точность воспроизведения художественно-графических элементов. Технологические параметры, составляющие процесс 3D-печати, и свойства полимеров: скорость печати, толщина

слоя, ориентация раstra, устойчивость к излучению, будут оказывать влияние на формирование конечной модели критериев оценки [11].

Целью исследования является анализ и формирование перечня критериев для оценки качества контрматриц для холодного конгревного тиснения, изготовленных с применением аддитивных технологий. В исследовании учтены технологические и эксплуатационные факторы, определяющие их работоспособность. Для достижения цели необходимо рассмотреть факторы влияния способа аддитивного изготовления на точность воспроизведения геометрии элементов рельефа, установить основные параметры, характеризующие качество поверхности и геометрическую стабильность контрматриц, а также определить факторы, влияющие на их тиражную стойкость.

Научная новизна работы заключается в систематизации критериев качества контрматриц применительно к условиям холодного конгревного тиснения и в обосновании комплексного подхода к их оценке, основанного на сочетании геометрических, физико-механических и эксплуатационных характеристик. Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученной модели критериев оценки при выборе технологий быстрого прототипирования, материалов и режимов постобработки для изготовления контрматриц с заданными эксплуатационными свойствами, а также входного контроля контрматриц.

Проблематика исследования

В отделочных процессах полиграфического производства применяется послепечатное оборудование и специализированная оснастка. Проектирование, разработку и изготовление оснастки берут на себя, как правило, поставщики, связанные с полиграфическим производством обязательствами и цепочкой поставок. Если на входном контроле или в процессе выявлены несоответствия оснастки и прессовых пар, возникает необходимость взаимодействия с поставщиком и время производственного процесса увеличивается. Актуальным требованием становится замена оснастки и инструмента на рабочем месте точно в срок с возможностью внесения изменений. Такому запросу на сегодняшний день отвечает аддитивное производство, а именно 3D-прототипирование, у которого наблюдается устойчивое, прогрессивное развитие технологий и оборудования, уменьшается цепочка технологического цикла, появляется возможность оперативно вносить изменения в конструкцию, без изготовления новых штампов и форм, срок изготовления сложных деталей снижается [12].

В традиционном производстве комплект клише для конгревного тиснения представляет собой пару, которая состоит из матрицы и ответной части (или «контрматрицы»). Матрица, как правило, изготавливается из металлов латуни, магния, алюминия и цинка в зависимости от дизайна, качественных характеристик обрабатываемого материала и требуемой тиражестойкости. Контрматрица может быть изготовлена как из металлов, так и из полимеров. При холодном конгревном тиснении зону контакта формируют три составляющие: матрица, обрабатываемый материал (бумага, картон, оттиск и др.) и контрматрица. Процесс изготовления контрматриц является многостадийным и занимает около 3–5 рабочих дней у поставщика полиграфической оснастки. Сокращение затрат рабочего времени,

а также расхода основных материалов — латуни, для изготовления дополнительной формы с целью отлива и термоформования является интересным с точки зрения рационализации труда и затрат машинного времени.

Целью текущего исследования, которое состоит из нескольких экспериментальных частей, является возможность изучения интеграции аддитивных технологий в послепечатные процессы, рассмотрение способов и материалов изготовления ответной части прессовой пары — контрматрицы для холодного конгревного тиснения с применением аддитивных технологий.

Методика проведения первичного эксперимента

Целью первой экспериментальной части являлась проверка гипотезы о технологической применимости и эксплуатационной пригодности прессовой пары (матрицы и контрматрицы), изготовленной методом послойного нанесения (Fused Deposition Modeling — FDM), для выполнения операций холодного конгревного тиснения на полиграфических и упаковочных материалах. В рамках эксперимента были поставлены следующие задачи:

- изучить технологию изготовления контрматриц традиционным способом и методы контроля качества контрматриц, а также оттисков с холодным конгревным тиснением;

- изучить свойства материалов для изготовления прессовой пары традиционным способом и сформировать модель критериев качества контрматриц;

- разработать тестовую модель прессовой пары с учётом требований к точности передачи рельефа и механической стабильности;

- изготовить прессовую пару из нескольких термопластичных полимерных материалов, совместимых с FDM-печатью;

- произвести входной контроль полученных контрматриц по основным группам критериев в соответствии с моделью качества.

Форматом проверки гипотезы стал квазиэксперимент с повторяющимися испытаниями. Использован сравнительный подход: в качестве образца-эталоны выступает прессовая пара, изготовленная по традиционной технологии (CNC-обработка), а в качестве экспериментального образца — прессовая пара, где контрматрица напечатана методом FDM с одной трехмерной модели на двух термопластах в нескольких экземплярах. Технология FDM — способ 3D-печати, который состоит в получении объектов на платформе построения путем послойного нанесения расплавленного полимера через сопло печатающей головки. Печатающая головка представляет собой экструдер, в который заправлена полимерная нить диаметром порядка 1,75 мм. На точность позиционирования печатающей головки по осям X, Y, Z влияют механика принтера и направляющие, данный параметр отвечает за качество печати [13].

Таким образом, полное преобразование от двухмерного чертежа до оттиска представлено на рис. 1.

В ходе анализа технологии изготовления контрматрицы, требований к оттискам и к ответной части матрицы были использованы общие технические требования, предъявляемые к контрматрице, изготовленной классическим способом. Изучены требования к оттиску. Так, конечный оттиск оценивается с точки зрения соответствия элементов

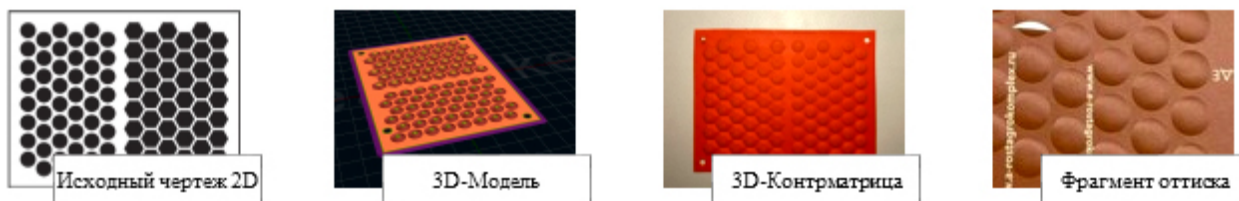


Рис. 1. Цифровое преобразование двухмерного чертежа в оттиск с холодным конгревным тиснением

Fig. 1. Digital transformation of a 2D drawing into a printed sheet with cold embossing

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Таблица 1. Модель критериев качества контрматрицы
Table 1. Model of counter-matrix quality criteria

Наименование группы критериев	Критерий	Допуски	Метод оценки
1. Воспроизведение всех элементов изображения контрматрицы	1.1. Соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели	Отклонения не допускаются	Визуально, контрольный чертеж на прозрачной пленке
	1.2. Соответствие линейных размеров элементам дизайна цифровой модели (оси X, Y)	Для аддитивных технологий определяется в диапазоне от 0,05 до 0,15 мм в зависимости от материала оттиска и сложности дизайна	Штангенциркуль
	1.3. Соответствие высоты размеров элементам дизайна цифровой модели (оси Z)	Для аддитивных технологий определяется в диапазоне от 0,05 до 0,15 мм в зависимости от материала оттиска и сложности дизайна	Штангенциркуль
2. Внешний вид контрматрицы	2.1. Цвет контрматрицы	Допускается любой цвет, пригодный для последующего сканирования, кроме прозрачного	Визуально
	2.2. Высота площадки, на которой расположены элементы дизайна контрматрицы	$\pm 0,02$ мм	Штангенциркуль
	2.3. Линейные размеры площадки по периметру, на которой расположены элементы дизайна контрматрицы	Допускается изменение размеров $\pm 0,5$ мм	Штангенциркуль
	2.4. Плоскостность объекта	Допускается изменение плоскостности объекта не более чем на $5-7^\circ$ от ровной горизонтальной поверхности	Методика измерения плоскостности
	2.5. Гладкость поверхности элементов дизайна	Поверхность не должна иметь явно выраженный рельеф, который обусловлен технологией изготовления	Визуально, лупа
3. Функциональные и эксплуатационные характеристики контрматрицы	3.1. Отсутствие механических повреждений и пузырей по всему объему	На внешней поверхности и внутри массы полимера не должно быть пузырей и трещин	Визуально, лупа
	3.2. Устойчивость к температурным воздействиям от $40-80^\circ\text{C}$ на вырубном прессе	Не должно происходить внешних разрушений и механических повреждений по всему объему контрматрицы	Визуально, лупа
	3.3. Устойчивость к периодическим ударным нагрузкам $5-25$ МПа ($500-2500$ т/м ²)	Не должно происходить внешних разрушений и механических повреждений по всему объему контрматрицы	Визуально, лупа
	3.4. Устойчивость к обработке щелочными растворами по всей площади	Не должно происходить внешних разрушений и механических повреждений по всему объему контрматрицы	Визуально, лупа
	3.5. Устойчивость к изгибу основания	Не должно происходить внешних разрушений, трещин и изломов	Визуально, лупа

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Таблица 2. Параметры печати контрматриц на материалах ABS и PLA

Table 2. Counter-matrix printing parameters on ABS and PLA materials

Материал/ Параметр	ABS (акрилонитрил- бутадиен- стирол)	PLA (полилактид)
Температура рабочего стола, °C	110	80
Температура экструдера, °C	240	205
Скорость печати, мм/сек.	40	40
Время печати, мин.	201	242,4
Высота слоя, мм	0,05	0,05
Толщина стенки, мм	2,5	2,5
Высота первого слоя, мм	0,3	0,3

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

дизайна утвержденному оригинал-макету, совмещения элементов конгревного тиснения с элементами печатного изображения и отсутствия механических повреждений материала отиска. Элементы конгревного тиснения должны быть проработаны, визуально заметны, иметь ощутимый и гладкий рельеф, на котором отсутствует растрескивание и другие механические повреждения материала как с лицевой, так и с обратной стороны. Контрматрица должна обладать прочностью и упругостью, так как при установке и смене материал подвергается изгибу на угол от 15 до 90°, а также возможным воздействиям химических щелочных и кислых сред, в ходе обработки основного комплекта оснастки для вырубки. Микрошероховатость выпуклых элементов дизайна должна быть минимальной, так как данный объект будет использоваться для штамповки и рельеф не должен проявляться на бумажном сырье. Нагрузка на объект от 20 до 60 т/м² с повторяемостью до 50 тыс. ударов на автоматических штамповальных прессах, предназначенных для вырубки, биговки, перфорации, конгревного тиснения и тиснения фольгой картона, гофрокартона, микрогофрокартона, бумаги, пластика. Таким образом формируются входные требования к контрматрице, представленные в табл. 1.

В качестве материалов для испытаний использованы полимерные нити: акрилонитриленстирол (ABS) и полилактид (PLA). PLA-пластик — термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. ABS-пластик (Акрилонитрил, Бутадиен, Стирол) — ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Пропорции ABS могут варьироваться в пределах: 15–35 % акрилонитрила, 5–30 % бутадиена и 40–60 % стирола. Как и полилактид, может разлагаться под воздействием солнечного света, что позволяет считать его экологически безопасным [9]. Также полимерные нити ABS и PLA зарекомендовали себя как полимеры, имеющие хорошую прочность и жесткость при сжатии в процессе прототипирования штампов [14].

В соответствии с выбором технологии изготовления, материалов и определения входных требований к контрматрице был спроектирован тест-

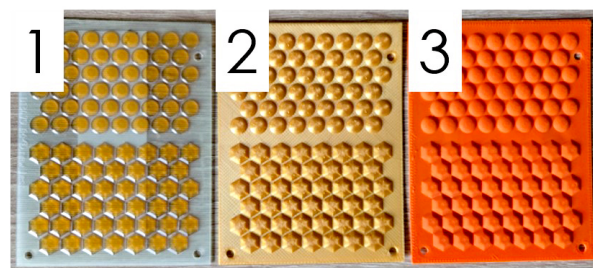


Рис. 2. Полученные контрматрицы:
1 — традиционный способ; 2 — способ 3D-печати на материале PLA; 3 — способ 3D-печати на материале ABS
Fig. 2. Produced counter-matrices: 1 — traditional method; 2 — 3D printing method of PLA material; 3 — 3D printing method of ABS material

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

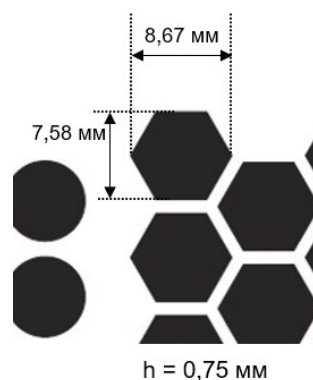


Рис. 3. Размеры элемента
«Шестиугольник» по X —
8,67 мм, Y — 7,58 мм,
Z — 0,75 мм

Fig. 3. Dimensions of
the "Hexagon" element
in X — 8.67 mm, Y — 7.58 mm,
Z — 0.75 mm

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

объект, который представляет собой основание форматом 79×102 мм, высотой 0,5 мм. На основании находятся простые геометрические формы элементов: круг — 48 штук и шестиугольник — 45 штук. Для печати контрматриц на материале ABS и PLA подобран принтер марки RAISE PRO2, параметры печати и режимов в ходе эксперимента представлены в табл. 2.

Для проведения входного контроля контрматриц, представленных на рис. 2, на однородность и повторяемость воспроизведения, были собраны данные для каждого объекта.

Для оценки качества самой первой группы критериев «Воспроизведение всех элементов изображения объекта» из табл. 1 было изготовлено по два экземпляра контрольных образцов: 2 — на материале ABS, 2 — на материале PLA. На полученных контрматрицах выбрана контрольная группа элементов: «Шестиугольник».

Для оценки воспроизведения геометрии элементов в ходе преобразования цифровых данных от двухмерного чертежа до получения реального объекта и его сканирования были выбраны линейные параметры элемента «Шестиугольник» в направлении осей X, Y, Z, представленных на чертеже (рис. 3).

Таблица 3. Сбор массива данных по размерам элемента «Шестиугольник» в разрезе осей XYZ для PLA
Table 3. XYZ dimensions dataset for the "Hexagon" part (PLA)

№ измерения	Контрольный элемент 1, мм			Контрольный элемент 2, мм			Контрольный элемент 3, мм			Контрольный элемент 4, мм			Контрольный элемент 5, мм		
	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z
1	8,58	7,69	0,97	8,59	7,74	0,77	8,77	7,62	0,81	8,64	7,81	0,91	8,74	7,76	1,12
2	8,65	7,57	0,87	8,63	7,56	0,97	8,89	7,67	0,98	8,71	7,74	1,03	8,61	7,62	1,08
3	8,65	7,79	0,88	8,65	7,74	0,87	8,86	7,78	0,84	8,74	7,64	1,04	8,81	7,86	0,93
4	8,61	7,64	0,74	8,72	7,62	0,79	8,87	7,88	1	8,65	7,72	0,96	8,66	7,8	0,92
5	8,62	7,79	1,1	8,61	7,72	0,85	8,78	7,84	0,88	8,64	7,83	1,08	8,74	7,73	1,03
6	8,55	7,69	1,07	8,76	7,65	0,72	8,74	7,81	0,85	8,69	7,79	0,76	8,71	7,89	1,07
7	8,69	7,61	0,72	8,62	7,67	0,83	8,69	7,76	0,85	8,69	7,76	1,02	8,76	7,85	1,1
8	8,66	7,64	0,88	8,58	7,64	0,68	8,81	7,77	0,97	8,68	7,68	1,11	8,75	7,94	1,01
9	8,51	7,69	0,81	8,69	7,64	0,68	8,83	7,74	0,92	8,66	7,82	0,87	8,75	7,77	0,89
10	8,52	7,63	0,77	8,63	7,72	0,73	8,74	7,84	0,76	8,65	7,65	0,93	8,8	7,94	1,08
Среднее	8,604	7,674	0,881	8,648	7,670	0,789	8,798	7,771	0,886	8,675	7,744	0,971	8,733	7,816	1,023
Станд.ош.	0,020	0,023	0,041	0,018	0,019	0,029	0,021	0,025	0,025	0,010	0,022	0,034	0,019	0,032	0,026
Медиана	8,615	7,665	0,875	8,630	7,660	0,780	8,795	7,775	0,865	8,670	7,750	0,990	8,745	7,825	1,050
Мода	8,650	7,690	0,880	8,630	7,740	0,680	8,740	7,840	0,850	8,640	—	—	8,740	7,940	1,080
Ст. откл.	0,062	0,072	0,131	0,058	0,059	0,093	0,065	0,080	0,079	0,033	0,070	0,107	0,060	0,100	0,082
Дисп. выб	0,004	0,005	0,017	0,003	0,004	0,009	0,004	0,006	0,006	0,001	0,005	0,011	0,004	0,010	0,007
Экспесс	— 1,206	— 0,290	— 0,741	— 0,063	— 0,534	— 0,025	— 1,016	0,074	— 1,057	— 0,096	— 1,415	0,169	0,810	0,078	— 1,272
Асимметрия	— 0,343	0,586	0,569	0,889	— 0,389	0,635	— 0,127	— 0,685	0,088	0,783	— 0,309	— 0,700	— 0,930	— 0,563	— 0,596
Интервал	0,180	0,220	0,380	0,180	0,180	0,290	0,200	0,260	0,240	0,100	0,190	0,350	0,200	0,320	0,230
Мини-м	8,510	7,570	0,720	8,580	7,560	0,680	8,690	7,620	0,760	8,640	7,640	0,760	8,610	7,620	0,890
Макс-м	8,690	7,790	1,100	8,760	7,740	0,970	8,890	7,880	1,000	8,740	7,830	1,110	8,810	7,940	1,120

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Таблица 4. Сбор массива данных по размерам элемента «Шестиугольник» в разрезе осей XYZ для ABS
Table 4. XYZ dimensions dataset for the "Hexagon" part (ABS)

№ измерения	Контрольный элемент 1, мм			Контрольный элемент 2, мм			Контрольный элемент 3, мм			Контрольный элемент 4, мм			Контрольный элемент 5, мм		
	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z
1	8,87	7,72	0,83	8,67	7,8	0,8	8,74	7,85	0,9	9,01	7,88	0,75	8,85	7,86	0,75
2	9,01	7,71	0,82	8,84	7,73	0,1	8,93	7,79	0,87	8,94	7,83	0,76	8,78	7,81	0,71
3	8,88	7,68	0,81	8,78	7,78	0,8	8,95	7,78	0,91	8,89	7,81	0,78	8,71	7,79	0,76
4	8,91	7,69	0,78	8,68	7,81	0,83	9,01	7,81	0,92	8,78	7,77	0,76	8,88	7,81	0,74
5	8,72	7,7	0,85	8,85	7,82	0,77	8,76	7,78	0,86	8,83	7,78	0,75	8,76	7,82	0,72
6	8,77	7,75	0,84	8,95	7,74	0,8	8,68	7,83	0,87	8,93	7,83	0,76	8,83	7,85	0,74
7	8,69	7,69	0,78	8,92	7,82	0,81	8,73	7,75	0,91	8,83	7,84	0,74	8,76	7,71	0,74
8	8,72	7,71	0,81	8,81	7,83	0,76	8,71	7,79	0,89	8,81	7,89	0,75	8,68	7,85	0,75
9	8,68	7,73	0,79	8,71	7,9	0,77	8,69	7,84	0,86	8,78	7,87	0,78	8,71	7,73	0,7
10	8,69	7,78	0,82	8,73	7,79	0,81	8,78	7,85	0,89	8,76	7,85	0,77	8,85	7,89	0,76
Среднее	8,79	7,72	0,81	8,79	7,80	0,73	8,80	7,81	0,89	8,86	7,84	0,76	8,78	7,81	0,74
Станд.оп.	0,04	0,01	0,01	0,03	0,02	0,07	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01
Медиана	8,75	7,71	0,82	8,80	7,81	0,80	8,75	7,80	0,89	8,83	7,84	0,76	8,77	7,82	0,74
Мода	8,72	7,71	0,82	—	7,82	0,80	—	7,85	0,87	8,78	7,83	0,75	8,85	7,81	0,74
Ст. откл.	0,12	0,03	0,02	0,10	0,05	0,22	0,12	0,03	0,02	0,08	0,04	0,01	0,07	0,06	0,02
Дисп. выб	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Экспесс	−0,73	0,83	−0,99	−1,12	1,20	9,74	−0,83	−1,18	−1,57	−0,61	−0,77	−0,75	−1,43	−0,12	−0,56
Асимм-сть	0,74	1,05	−0,08	0,27	0,44	−3,11	0,91	−0,09	0,00	0,68	−0,33	0,35	−0,01	−0,71	−0,74
Интервал	0,33	0,10	0,07	0,28	0,17	0,73	0,33	0,10	0,06	0,25	0,12	0,04	0,20	0,18	0,06
Мини-м	8,68	7,68	0,78	8,67	7,73	0,10	8,68	7,75	0,86	8,76	7,77	0,74	8,68	7,71	0,70
Макс-м	9,01	7,78	0,85	8,95	7,90	0,83	9,01	7,85	0,92	9,01	7,89	0,78	8,88	7,89	0,76

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Для оценки параметра 1.1. «Соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели» был проведен визуальный осмотр объектов. Выявлено, что рисунок и геометрия на всех образцах материала ABS и PLA соответствуют входным данным, преобразование которых показано на рис. 1.

Далее произведен сбор и оценка массива данных на соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели (п. 1.1, табл. 1), соответствие линейных размеров элементам дизайна цифровой модели (оси X, Y) (п. 1.2, табл. 1) и соответствие высоты размеров элементам дизайна цифровой модели (оси Z) (п. 1.3, табл. 1). В массив данных была взята группа из пяти контрольных элементов формы «Шестиугольник» материала PLA и ABS. Пример сбора данных приведен в табл. 3 и табл. 4 соответственно.

Проведенный статистический анализ 10-кратных измерений пяти контрольных элементов контрматрицы из материала PLA показал соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели. Наибольшая стабильность геометрических размеров из полученных данных определяется для осей X и Y. Так, среднее квадратичное отклонение размеров элементов по осям X и Y не превышает 0,100 мм, а для большинства контрольных элементов находится в пределах 0,03–0,07 мм, что говорит о высокой повторяемости процесса экструзии, стабильности позиционирования печатающей головки в горизонтальной плоскости и отсутствия усадки после охлаждения для материала PLA [15]. Наименьшая технологическая стабильность выявлена для параметров высоты контрольных элементов по оси Z. Максимальное значение среднеквадратичного отклонения — 0,131 мм и наибольший интервал варьирования (0,380 мм) зафиксированы для контрольного элемента 1. Данная закономерность для материала PLA обусловлена спецификой послойного формообразования: погрешность по оси Z носит накопительный характер и зависит от адгезии первого слоя к столу печатного устройства, адгезии между первыми слоями, а также наличия люфтов в механических узлах печатной головки.

Анализ законов распределения для контрольной группы элементов говорит о том, что отклонения имеют преимущественно отрицательный эксцесс, то есть вершины распределений более плоские, чем у нормального закона распределения. Это указывает на наличие нескольких наложенных друг на друга факторов рассеивания. Асимметрия умеренная, без выраженных систематических сдвигов, что говорит о преобладании случайных технологических погрешностей.

Проведенный статистический анализ 10-кратных измерений пяти контрольных элементов контрматрицы из материала ABS показал соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели. Наибольшая стабильность и повторяемость для осей Y и Z. Среднеквадратичное отклонение по оси Y не превышает 0,06 мм, а по оси Z составляет всего лишь 0,01–0,02 мм. Это говорит о высокой степени работоспособности механики оборудования. Наименьшая стабильность характерна для линейных размеров по оси X. Максимальное значение среднеквадратичного отклонения — 0,12 мм и наибольший интервал варьирования — 0,33 мм зафиксированы для элементов 1 и 3. Данная закономерность связана с физико-химическими свойствами материала ABS, который подвержен некоторой термической усадке и короблению при остывании [15].

Анализ законов распределения выявил выраженную положительную асимметрию по оси X — коэффициенты асимметрии до 0,91. Это указывает на наличие систематической технологической погрешности, которая, вероятно, связана с направленным натяжением ремней или односторонним обдувом модели, что приводит к предсказуемому смещению размеров контрольной группы элементов в большую сторону.

Выводы

Сопоставление статистических данных 10-кратных измерений пяти контрольных элементов контрматрицы из материалов PLA и ABS позволяет сделать следующие промежуточные выводы об их технологической стабильности и воспроизводимости по группе критериев «Воспроизведение всех элементов изображения объекта» для пяти контрольных элементов:

1. По критерию «Соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели» (п. 1.1. в табл. 1) контрматрицы из материалов PLA и ABS полностью соответствуют требованиям.

2. По критериям «Соответствие линейных размеров элементам дизайна цифровой модели (оси X, Y)» (п. 1.2. в табл. 1) и «Соответствие высоты размеров элементам дизайна цифровой модели (оси Z)» (п. 1.3. в табл. 1) контрматрица из материала PLA показывает типовую проблему технологии FDM-печати: высокая точность в плоскости осей X, Y и значительный разброс по высоте — ось Z. Максимальное среднеквадратичное отклонение по оси Z у материала PLA — 0,131 мм, что почти в 6,5 раза выше, чем у материала ABS — 0,02 мм. Таким образом, для материала PLA входные режимы печати являются наиболее критичными. Контрматрица из материала ABS показывает стабильность по оси Z (среднеквадратичное отклонение 0,01–0,02 мм), что говорит о высокой межслойной когезии. При этом материал ABS утрачивает стабильность в плоскости X, где среднеквадратичное отклонение достигает 0,12 мм из-за термической усадки, которая свойственна данному материалу.

3. Оценка сходимости десяти измерений контрольной группы из пяти элементов показывает, что контрматрица из материала ABS имеет повторяемость процесса печати контрматриц выше, чем у контрматрицы из материала PLA. Дисперсии и стандартные ошибки измерений контрольных элементов стабильны по осям Y, Z и стремятся к нулю. Процесс экструзии для материала ABS дает более предсказуемый результат от итерации к итерации. Воспроизводимость геометрии в процессе печати между пятью контрольными элементами на контрматрице для материала PLA равномернее. У контрматрицы из материала ABS наблюдается резкий перепад: элементы в центре и по краям по оси X изменяются из-за усадки, в то время как высота по оси Z воспроизводится эталонно на всей площади стола.

Следовательно, если при воспроизведении всех элементов изображения объекта для изготовления контрматрицы критически важна точность по оси Z, то материал ABS является лучшим вариантом, обеспечивая прецизионную стабильность. Если же критически важны линейные размеры в плоскости осей X и Y, предпочтительнее использовать материал PLA.

Рекомендуется допустить к лабораторным испытаниям для получения оттиска на картоне толщиной от 0,40 до 0,43 мм контрматрицу, изготовленную

из материала PLA с сопоставлением геометрических размеров по X, Y, Z контрольной группы элементов уже на оттиске.

Продолжить исследование контрматриц по двум другим группам критериев «Внешний вид контрматрицы» и «Функциональные и эксплуатационные характеристики контрматрицы» для формирования комплексной оценки на допуск к лабораторным и промышленным испытаниям в условиях типографии.

Список источников / References

1. Козлов Д. Р. Индустрия 4.0. Перспективы и вызовы // Вестник науки и образования. 2017. № 8 (32). С. 30–33. EDN: WQGUUV.
2. Шваб К. Четвертая промышленная революция. Москва: Эксмо, 2016. 138 с.
3. Тимохин А. М., Тиунова Е. С. Анализ полиграфического рынка РФ // МедиаВектор. 2022. № 4. С. 111–115. EDN: JQCIGS.
4. Timokhin A. M., Tiunova E. S. Analysis of the printing market of the Russian Federation. *MediaVector*. 2022;4:111–115. EDN: JQCIGS. (In Russ.).
5. Мамедова Л. Э. Г., Лесник Ф. М. Методологические и практические аспекты обеспечения конкурентоспособности промышленных предприятий: цели, задачи и перспективы дальнейшего развития // Вестник Академии знаний. 2025. № 4 (69). С. 361–369. EDN: UYMRUJ.
6. Mamedova L. E. G., Lesnik P. M. Methodological and practical aspects of ensuring competitiveness of industrial enterprises: goals, objectives and prospects for further development. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2025;4(69):361–369. EDN: UYMRUJ. (In Russ.).
7. Horst D., Duvoisin Ch., Vieira R. Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review. *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2018;8(8):2454–4698.
8. Греков Г. И. Технологические инновации и синхромаркетинг в полиграфии: новые горизонты // Практический маркетинг. 2025. № 1 (331) С. 16–20. <https://doi.org/10.24412/2071-3762-2025-1331-16-20>. EDN: YJYHQS.
9. Grekov G. I. Technological innovations and synchromarketing in print: New horizons. *Practical Marketing*. 2025;1(331):16–20. <https://doi.org/10.24412/2071-3762-2025-1331-16-20>. EDN: YJYHQS. (In Russ.).
10. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Boston: Springer, 2010. 459 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>. ISBN 978-1-4419-1119-3. EDN: YDZUZH.
11. Фролова А. Б., Шигапов А. И. История, текущее состояние и перспективы развития аддитивных технологий // Научные известия. 2022. № 29. С. 198–202. EDN: THYPWV.
12. Frolova A. B., Shigapov A. I. History, current status and development prospects of additive technologies. *Scientific News*. 2022;29:198–202. EDN: THYPWV. (In Russ.).
13. Цветкова Т. М. Исследование рынка аддитивного производства в России // Научные записки молодых исследователей. 2015. № 4. С. 13–21. EDN: VPKFQH.
14. Tsvetkova T. M. Issledovaniye rynka additivnogo proizvodstva v Rossii. *Nauchnye zapiski molodykh issledovatelei = Scientific Notes of Young Researchers*. 2015;4:13–21. EDN: VPKFQH. (In Russ.).
15. Аддитивные технологии — один из драйверов развития промышленности // Аддитивные технологии. 2024. № 2. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/additivnye-tehnologii-odin-iz-drayverov-razvitiya-promyshlennosti.html> (дата обращения: 12.01.2026).
16. Additivnye tekhnologii — odin iz drayverov razvitiya promyshlennosti. *Additive Technologies*. 2024;2. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/additivnye-tehnologii-odin-iz-drayverov-razvitiya-promyshlennosti.html> (accessed: 12.01.2026). (In Russ.).
17. Левина Т. А., Кушнир И. С., Глухих Я. М., Ключков А. Я. К вопросу о влиянии параметров процесса на механические свойства 3D-печати FDM: комплексный обзор // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. 2023. Т. 15, № 3. С. 123–131. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.39.12.017>. EDN: FKMJRJX.
18. Levina T. A., Kushnir I. S., Gluhikh Ya. M., Klovchikov A. Ya. On the influence of process parameters on the mechanical properties of 3D printing FDM: a Comprehensive review. *Herald of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2023;15(3):123–131. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.39.12.017>. EDN: FKMJRJX. (In Russ.).
19. Армашова-Тельник Г. С., Соколова П. Н., Дегтерев Д. В. Аддитивные технологии: новационный эффект в промышленности // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82, № 4. С. 347–353. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-347-353>. EDN: OOJOVJ.
20. Armashova-Telnik G. S., Sokolova P. N., Degterev D. V. Additive technologies: an Innovative effect digitalization in industry. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020;82(4):347–353. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-347-353>. EDN: OOJOVJ. (In Russ.).
21. Трошин А. А., Захаров О. В. Обзор технологических возможностей FDM-3D принтеров // Современные материалы, техника и технологии. 2020. № 1 (28). С. 61–65. EDN: SHUGOC.
22. Troshin A. A., Zakharov O. V. Review of technological capabilities of FDM-3D printers. *Modern materials, equipment and technologies*. 2020;1(28):61–65. EDN: SHUGOC. (In Russ.).
23. Хлыновский А. 3D-печать оснастки при прототипировании изделий из металла // Аддитивные технологии. 2024. № 2. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/3d-pechat-osnastki-pri-prototipirovanii-izdeliy-iz-metalla.html> (дата обращения: 12.01.2026).
24. Khllynovskiy A. 3D pechat' osnastki pri prototipirovanii izdeliy iz metalla. *Additive Technologies*. 2024;2. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/3d-pechat-osnastki-pri-prototipirovanii-izdeliy-iz-metalla.html> (accessed: 12.01.2026). (In Russ.).
25. Жуков А. В., Никифоров А. А., Яковичин А. С. Пластмассы для аддитивных технологий (обзор) // Вестник СГТУ. 2021. № 4 (91). С. 57–70. EDN: OEGRFD.
26. Zhukov A. V., Nikiforov A. A., Yakovichin A. S. Plastic materials for additive technologies (review). *Vestnik of Saratov State Technical University*. 2021;4(91):57–70. EDN: OEGRFD. (In Russ.).

Информация об авторе:

ФЕДДЕР Мария Сергеевна, доцент кафедры «Технологии полиграфического производства» Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7552-0950

AuthorID (РИНЦ): 1355338

e-mail: maryfedder@gmail.com

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в пред-

ставленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи автор не использовал генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026; одобрена после рецензирования 01.07.2026; принята к публикации 27.07.2026.

Information about the author:

FEDDER Mariya Sergeyevna, Associate Professor of the Printing Technology Department, Saint Petersburg

State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg.

SPIN-code: 7552-0950

AuthorID (RSCI): 1355338

e-mail: maryfedder@gmail.com

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 author did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 02.02.2026; approved after reviewing 01.07.2026; accepted for publication 27.07.2026.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ КРИВЫХ В ТОЧЕЧНОМ ИСЧИСЛЕНИИ

А. В. Степура¹, Е. В. Конопацкий²✉

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

²Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65

✉ e.v.konopatskiy@mail.ru

В инженерной геометрии актуальной задачей является создание гибких кривых, инцидентных заданным точкам. В работе описан метод моделирования интерполяционных кривых в точечном исчислении на основе кривых Безье.

Основой модификации кривых Безье является замена симплекса контрольных точек в уравнении кривой на узлы интерполяции, при которой используется равномерное распределение значений параметра, обеспечивающее выполнение условия инцидентности заданным точкам. Однако применение кривых Безье не всегда позволяет эффективно моделировать объекты и процессы с экспоненциальным характером изменения. В исследовании предложено использовать этот же метод для определения интерполяционных кривых, полученных на основе экспоненциальных функций в точечном исчислении.

В результате был получен новый класс экспоненциальных интерполяционных кривых, форма которых определяется с помощью коэффициентов k_i . Преимуществом такого подхода является гибкость в управлении формы и возможность создания кривых, обладающих наперёд заданными геометрическими свойствами путём решения минимаксных задач коэффициентов k_i .

Предложенный метод расширяет инструментарий геометрического моделирования в САПР, а также может быть использован для моделирования и цифровой поддержки жизненного цикла изделий сложной формы и прогнозирования процессов с экспоненциальным ростом.

Ключевые слова: интерполяционная кривая, экспоненциальная функция, геометрическое моделирование, точечное исчисление, параметризация, системы автоматизированного проектирования, информационное моделирование

Для цитирования: Степура А. В., Конопацкий Е. В. Моделирование экспоненциальных интерполяционных кривых в точечном исчислении. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 56–65. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-56-65>. EDN: ZLQGIV.



© Степура А. В., Конопацкий Е. В., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODELING EXPONENTIAL INTERPOLATION CURVES IN POINT CALCULUS

A. V. Stepura¹, E. V. Konopatskiy²✉

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Yaroslavskoye Rd., 26, Moscow, 129337, Russia

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Ilinskaya St., 65, Nizhny Novgorod, 603000, Russia

✉ e.v.konopatskiy@mail.ru

In engineering geometry the problem of creating flexible curves incident to given points is relevant. The article describes a method for modeling interpolation curves in point calculus based on Bezier curves.

The basis for modifying Bezier curves is replacing the simplex of control points in the curve equation with interpolation nodes. This method utilizes a uniform distribution of parameter values, ensuring that

the incidence condition for the given points is satisfied. However, the use of Bezier curves does not always allow for the effective modeling of objects and processes with exponential change. Therefore, it is proposed to use the same method to define interpolation curves obtained from exponential functions in point calculus.

The result is a new class of exponential interpolation curves which shape is determined using coefficients k_i . The advantage of this approach is flexibility in shape control and the ability to create curves with predetermined geometric properties by solving minimax problems for the coefficients k_i .

The proposed method expands the geometric modeling toolkit in CAD systems and also it can be used for modeling and digitally supporting the lifecycle of complex products and forecasting processes with exponential growth.

Keywords: interpolation curve, exponential function, geometric modeling, point calculus, parameterization, computer-aided design systems, information modeling

For citation: Stepura A. V., Konopatskiy E. V. Modeling exponential interpolation curves in point calculus. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):56–65. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-56-65>. EDN: ZLQGIIV. (In Russ.).



© Stepura A. V., Konopatskiy E. V., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В современных системах автоматизированного проектирования (САПР) и информационного моделирования (ТИМ) кривые линии играют фундаментальную роль. Они используются для построения формообразующих элементов поверхностей, восстановления объектов по облакам точек, а также для визуализации результатов инженерных расчетов. С развитием компьютерной графики и методов цифровой поддержки жизненного цикла изделий требования к гибкости и точности геометрических моделей постоянно возрастают.

Наиболее распространенным инструментом моделирования кривых в современном программном обеспечении являются кривые Безье [1–3] и их обобщения (B-сплайны [4, 5], NURBS [6])¹. Данные кривые обладают рядом достоинств: они интуитивно понятны благодаря управляющим точкам и обеспечивают высокую гладкость. Однако классические кривые Безье относятся к категории аппроксимирующих кривых — они проходят только через первую и последнюю точки характеристической ломаной, что усложняет задачу точного прохождения через заданный массив опорных точек. Для решения этой задачи разработаны методы построения интерполяционных кривых на основе полиномиальных и сплайновых функций [2, 3, 7, 8].

Работы [9–11] посвящены повышению точности интерполяции и снижению осцилляций². В частности, в исследовании [10] анализируются приведенные погрешности интерполяции неаналитических кривых, что подчеркивает сложность получения адекватных геометрических форм для объектов с нерегулярной геометрией. Однако в перечисленных работах, как правило, используется полиномиальный базис. Вместе с тем многие физические, биологические и технические процессы (теплопередача, рост трещин, динамика популяций, ползучесть материалов) носят ярко выраженный экспоненци-

альный характер. Геометрическое моделирование таких процессов требует соответствующего математического аппарата, позволяющего создавать кривые, форма которых адекватно отражает экспоненциальную природу явления. В работе [12] исследуются интерполяционные последовательности вида $\{\pm\lambda_n\}$ ($\lambda_n > 0$) и проблема неполноты системы экспонент $\{e^{\pm\lambda_n z}\}$ по равномерной норме на семействе произвольных спрямляемых кривых. Однако эти исследования носят фундаментальный характер и сложно применимы для решения конструктивных задач геометрического моделирования кривых линий и поверхностей на их основе.

Математический аппарат точечного исчисления [13, 14] предоставляет широкие возможности для конструирования кривых с различными свойствами за счет варьирования базисных функций. В работе [15] был предложен метод определения точечных уравнений кривых, проходящих через наперед заданные точки, на основе кривых Безье. Этот метод может быть реализован не только для полиномиальных, но и для других функций, но на сегодняшний день отсутствуют векторно-параметрические уравнения экспоненциальных интерполяционных кривых, построенных в рамках точечного исчисления и гарантирующих прохождение через заданные узлы интерполяции.

Целью исследования является использование предложенного ранее метода построения интерполяционных кривых на основе кривых Безье [15] для определения в точечном исчислении кривых на основе экспоненциальных функций, обеспечивающих инцидентность узлам интерполяции.

Моделирование интерполяционных кривых на основе кривых Безье

Пусть задан симплекс $n + 1$ пространства с помощью независимых точек $A_1, A_2, \dots, A_{n+1}$. Будем использовать эти же точки в качестве вершин харак-

¹ Попов Е. В., Шоркина И. Н. Автоматическое построение NURBS поверхности корпуса корабля // Труды Междунар. конф. по компьютерной графике и зрению «Графикон». 2022. № 32. С. 162–169. <https://doi.org/10.20948/graphicon-2022-162-169>. EDN: DAPNZJ.

² Яксубаев К. Д. Построение параметрического интерполяционного многочлена Лагранжа // Потенциал интеллектуально одаренной молодежи — развитию науки и образования: материалы XI Междунар. науч. форума молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников / под общ. ред. Т. В. Золиной. Т. 11. Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. С. 98–101. EDN: JWACIG.

теристической ломаной кривой Безье n -го порядка [15], что описывается следующим точечным уравнением в форме Бернштейна:

$$M = \sum_{i=0}^n A_{i+1} \cdot C_n^i \cdot (1-t)^{n-i} \cdot t^i, \quad (1)$$

где M — текущая точка кривой Безье; $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ — биномиальные коэффициенты (коэффициенты Бернштейна); $t \in [0, 1]$ — текущий параметр.

Важным свойством этого представления является то, что сумма всех весовых функций $\sum_{i=0}^n C_n^i \cdot (1-t)^{n-i} \cdot t^i = 1$, что гарантирует принадлежность кривой Безье аффинному пространству той размерности, в котором заданы точки A_i .

Точки A_i в уравнении (1) являются вершинами характеристической ломаной Безье, и кривая в общем случае через них не проходит (за исключением начальной точки A_1 и конечной точки A_{n+1}). Чтобы получить интерполяционную кривую, проходящую через заданные точки $M_1, M_2, \dots, M_{n+1}$, необходимо выполнить замену симплекса $n+1$ пространства и переопределить вершины ломаной A_i через узлы интерполяции M_j .

Для этого используем равномерное распределение параметра t в соответствии с номерами узлов. Поставим условие, чтобы при значениях параметра $t_j = \frac{j-1}{n}$ (где $j = 1 \dots n+1$) кривая проходила через точку M_j :

$$M_j = \sum_{i=0}^n A_{i+1} \cdot C_n^i \cdot \left(1 - \frac{j-1}{n}\right)^{n-i} \cdot \left(\frac{j-1}{n}\right)^i. \quad (2)$$

Для $j = 1$ ($t = 0$) получаем $M_1 = A_1$. Для $j = n+1$ ($t = 1$) получаем $M_{n+1} = A_{n+1}$. Остальные $n-1$ уравнений образуют систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных точек $A_2, \dots, A_n$.

Умножив обе части уравнения (2) на n^n , получим систему в более удобном для решения виде:

$$\sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} (n-j+1)^{n-i} (j-1)^i A_{i+1} = n^n M_j. \quad (3)$$

Решая эту систему методом Крамера в символьной форме, выражаем контрольные точки кривой Безье A_i через узлы интерполяции M_j .

Подстановка полученных выражений в исходное уравнение кривой Безье (1) дает искомое точечное уравнение интерполяционной кривой, проходящей через наперед заданные точки $M_1, M_2, \dots, M_{n+1}$.

Предложенный метод обладает рядом важных свойств:

1. Универсальность. Полученное точечное уравнение инвариантно к размерности пространства. Оно может быть использовано для моделирования как плоских кривых, так и кривых в пространстве любой размерности путем перехода к системе параметрических уравнений посредством покомпонентного расчета.

2. Равномерность параметризации. Заложенная в основу метода равномерная параметризация ($t_j = \frac{j-1}{n}$) в ряде случаев (при равномерном распределении узлов интерполяции) позволяет установить линейную зависимость между натуральными зна-

чениями координат и параметром t , что упрощает анализ и сокращает объем вычислений.

3. Обобщение. Полученные интерполяционные кривые являются частным случаем парабол n -го порядка и наследуют их геометрические свойства.

Рассмотрим применение метода для построения интерполяционной кривой 2-го порядка, проходящей через три наперед заданные точки M_1, M_2, M_3 .

Точечное уравнение кривой Безье 2-го порядка имеет следующий вид:

$$M = A_1(1-t)^2 + 2A_2(1-t)t + A_3t^2. \quad (4)$$

Согласно описанному методу, примем равномерное распределение параметра t :

— при $t = 0$ кривая проходит через точку M_1 , следовательно, $A_1 = M_1$;

— при $t = 1$ кривая проходит через точку M_3 , следовательно, $A_3 = M_3$;

— при $t = \frac{1}{2}$ кривая должна проходить через точку M_2 .

Подставим $t = \frac{1}{2}$ в уравнение (4), учитывая, что $(1-t) = \frac{1}{2}$:

$$M_2 = \frac{1}{4}M_1 + \frac{1}{2}A_2 + \frac{1}{4}M_3.$$

Решим это уравнение относительно неизвестной точки A_2 :

$$A_2 = 2M_2 - \frac{1}{2}M_1 - \frac{1}{2}M_3. \quad (5)$$

Подставим найденные значения A_1, A_2, A_3 в исходное уравнение (4):

$$M = M_1(1-t)(1-2t) + 4M_2t(1-t) + M_3t(2t-1). \quad (6)$$

Уравнение (6) является искомым. Оно описывает дугу параболы 2-го порядка, которая гарантированно проходит через заданные узлы интерполяции M_1, M_2, M_3 .

Моделирование экспоненциальных интерполяционных кривых

Описанный выше метод может быть применен для моделирования экспоненциальных интерполяционных кривых. При этом весовые функции возле координатных векторов A_i определяются в виде $e^{k_i t}$.

В качестве примера рассмотрим моделирование экспоненциальной интерполяционной кривой, проходящей через 3 точки. Точечное уравнение исходной экспоненциальной кривой имеет следующий вид:

$$M = A_1 e^{k_1 t} + A_2 e^{k_2 t} + A_3 e^{k_3 t}, \quad (7)$$

где A_1, A_2, A_3 — симплекс контрольных точек; k_1, k_2, k_3 — коэффициенты, определяющие форму экспоненциальной кривой.

Обратим внимание, что в данном случае мы не накладываем ограничение принадлежности кривой к пространству симплекса точек A_1, A_2, A_3 : $e^{k_1 t} + e^{k_2 t} + e^{k_3 t} \neq 1$.

Принимаем равномерное распределение параметра t от 0 до 1. Тогда при $t = 0$, кривая проходит через точку M_1 , при $t = \frac{1}{2}$ — через точку M_2 и при $t = 1$ — через точку M_3 . Подставляем эти значения

в исходное уравнение (7) и получаем систему экспоненциальных уравнений:

$$\begin{cases} M_1 = A_1 + A_2 + A_3 \\ M_2 = A_1 e^{\frac{k_1}{2}} + A_2 e^{\frac{k_2}{2}} + A_3 e^{\frac{k_3}{2}} \\ M_3 = A_1 e^{k_1} + A_2 e^{k_2} + A_3 e^{k_3} \end{cases} \quad (8)$$

Решив систему экспоненциальных уравнений (8), находим точки симплекса A_1, A_2, A_3 :

$$A_1 = \frac{-M_1 e^{\frac{k_2+k_3}{2}} + e^{\frac{k_2}{2}} M_2 + e^{\frac{k_3}{2}} M_2 - M_3}{-e^{k_1} + e^{\frac{k_1}{2}} + e^{\frac{k_1+k_3}{2}} - e^{\frac{k_2+k_3}{2}}};$$

$$M = \frac{-e^{\frac{k_1 t}{2} + \frac{k_2}{2} + k_3} + e^{\frac{k_1 t}{2} + \frac{k_3}{2} + k_2} + e^{\frac{k_2 t}{2} + \frac{k_1}{2} + k_3} - e^{\frac{k_2 t}{2} + \frac{k_3}{2} + k_1} - e^{\frac{k_3 t}{2} + \frac{k_1}{2} + k_2} + e^{\frac{k_3 t}{2} + \frac{k_2}{2} + k_1}}{-e^{\frac{k_3}{2} + k_1} + e^{\frac{k_3}{2} + k_2} + e^{\frac{k_2}{2} + k_1} - e^{\frac{k_1}{2} + k_2} + e^{\frac{k_1}{2} + k_3} - e^{\frac{k_2}{2} + k_3}} M_1 +$$

$$+ \frac{e^{k_2 t + k_1} - e^{k_1 t + k_2} - e^{k_3 t + k_1} + e^{k_1 t + k_3} + e^{k_3 t + k_2} - e^{k_2 t + k_3}}{-e^{\frac{k_3}{2} + k_1} + e^{\frac{k_3}{2} + k_2} + e^{\frac{k_2}{2} + k_1} - e^{\frac{k_1}{2} + k_2} + e^{\frac{k_1}{2} + k_3} - e^{\frac{k_2}{2} + k_3}} M_2 +$$

$$+ \frac{e^{k_1 t + \frac{k_2}{2}} - e^{k_1 t + \frac{k_3}{2}} - e^{k_2 t + \frac{k_1}{2}} + e^{k_2 t + \frac{k_3}{2}} + e^{k_3 t + \frac{k_1}{2}} - e^{k_3 t + \frac{k_2}{2}}}{-e^{\frac{k_3}{2} + k_1} + e^{\frac{k_3}{2} + k_2} + e^{\frac{k_2}{2} + k_1} - e^{\frac{k_1}{2} + k_2} + e^{\frac{k_1}{2} + k_3} - e^{\frac{k_2}{2} + k_3}} M_3. \quad (10)$$

Полученное в векторно-параметрической форме точечное уравнение (10) является общим уравнением, в которое можно подставлять любые координаты узлов интерполяции. Если в это уравнение подставить конкретные значения координат M_1, M_2, M_3 и коэффициентов формы кривой k_1, k_2, k_3 , то получим более компактное представление. Например, используем следующие координаты узлов интерполяции $M_1(1;2), M_2(2;3), M_3(4;1)$ и значения коэффициентов формы кривой $k_1 = 0,2, k_2 = 2, k_3 = 1,2$. В результате получим следующую систему параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x = -0,110477318e^{0,2t} + \\ + 0,110108002e^{2t} + 1,000369320e^{1,2t} \\ y = -2,347685632e^{0,2t} - \\ - 2,597078618e^{2t} + 6,944764248e^{1,2t}. \end{cases} \quad (11)$$

Рассмотрим визуализацию (рис. 1) полученной геометрической модели экспоненциальной кривой (сплошная линия), которая описывается системой параметрических уравнений (11). Штриховой линией показана интерполяционная кривая, полученная на основе кривой Безье, которая описывается уравнением (6).

Исследуем характер изменения формы полученной кривой при различных значениях k_1, k_2, k_3 . Чтобы не повторять приведенный выше пример, используем другие узлы интерполяции $M_1(1;2), M_2(2;1), M_3(4;1)$. Результаты представлены в табл. 1.

Анализируя результаты исследований, некоторые примеры которых представлены в табл. 1, можно сделать следующие выводы:

1. Экспоненциальные функции позволяют обеспечить построение интерполяционных кривых, индентных заданным точкам.

2. Форма кривой зависит не только от координат исходных точек, но и от коэффициентов k_1, k_2, k_3 . При этом могут быть получены кривые, содержащие точки перегиба и без них. Если кривая является монотонной и не имеет точек перегиба, она

$$A_2 = \frac{-M_1 e^{\frac{k_1+k_3}{2}} + e^{\frac{k_1}{2}} M_2 + e^{\frac{k_3}{2}} M_2 - M_3}{e^{\frac{k_1}{2} + \frac{k_2}{2}} - e^{\frac{k_1+k_3}{2}} - e^{k_2} + e^{\frac{k_2+k_3}{2}}};$$

$$A_3 = \frac{M_1 e^{\frac{k_1+k_2}{2}} - e^{\frac{k_1}{2}} M_2 - e^{\frac{k_2}{2}} M_2 + M_3}{e^{\frac{k_1}{2} + \frac{k_2}{2}} - e^{\frac{k_1+k_3}{2}} - e^{\frac{k_2+k_3}{2}} + e^{k_3}}. \quad (9)$$

Подставляем полученные выражения A_1, A_2, A_3 в исходное уравнение (7) и после преобразований находим искомое уравнение экспоненциальной интерполяционной кривой, проходящей через три точки:

может применяться для моделирования плавных переходов. Случаи с точками перегиба могут быть использованы для моделирования S-образных кривых.

3. При значениях k_1, k_2, k_3 более 5 происходят значительные осцилляции. Положительные большие значения k_i приводят к резкому росту осцилляций, что может быть использовано для моделирования аварийных или критических режимов.

4. Значения коэффициентов k_1, k_2, k_3 можно выбирать таким образом, чтобы кривая проходила через заданные точки по кратчайшему расстоянию. Эти значения могут быть определены путём решения минимаксной задачи, что составляет перспективу дальнейших исследований.

Рассмотрим частный случай определения точечного уравнения интерполяционной экспоненциальной кривой, принадлежащей симплексу A_1, A_2, A_3 . Для этого необходимо выполнение условия — сумма весовых функций должна быть равна единице [15]: $e^{k_1 t} + e^{k_2 t} + e^{k_3 t} = 1$.

Исходя из этого условия, можно исключить один из коэффициентов k_i . Для примера исключим коэффициент k_3 :

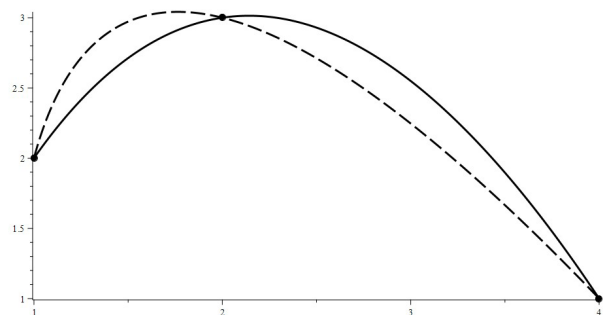
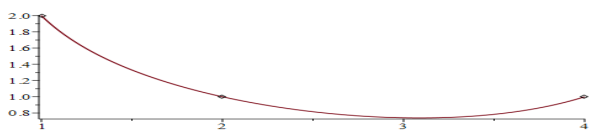
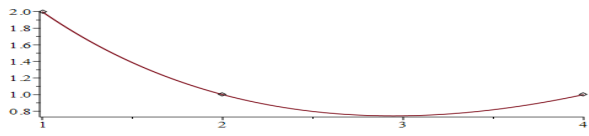
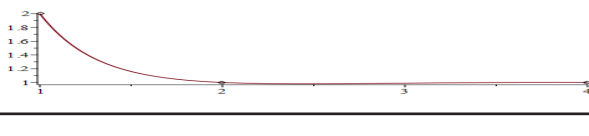
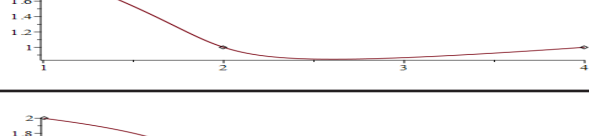
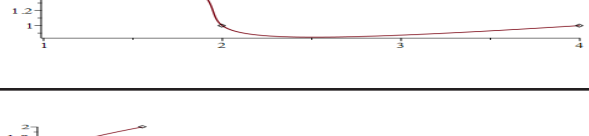
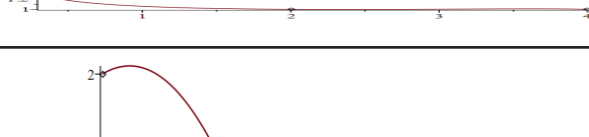
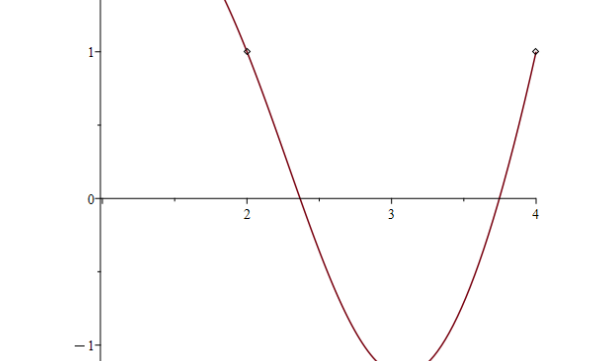


Рис. 1. Экспоненциальная интерполяционная кривая при $e^{k_1 t} + e^{k_2 t} + e^{k_3 t} = 1$

Fig. 1. Exponential interpolation curve for $e^{k_1 t} + e^{k_2 t} + e^{k_3 t} = 1$

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Таблица 1. Исследование экспоненциальной интерполяционной кривой при различных значениях k_1, k_2, k_3
Table 1. Research of the exponential interpolation curve for different values of k_1, k_2, k_3

№ п/п	k_1	k_2	k_3	Экспоненциальная кривая	
				Визуализация кривой	Примечания
1	-1	2	4		Монотонная кривая без петель и точек перегиба
2	0	1	2		Монотонная кривая без петель и точек перегиба
3	1	2	-4		Кривая стремится к оси Oх и имеет точку перегиба
4	-1	-2	4		Кривая имеет точку перегиба
5	-2	3	-5		Кривая имеет точку перегиба
6	-3	-2	-1		Кривая имеет осцилляцию, стремящуюся к оси Oy
7	2	3	5		Кривая имеет ярко выраженную осцилляцию

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

$$k_3 = \frac{\ln(1 - e^{k_1 t} - e^{k_2 t})}{t}. \quad (12)$$

Подставим полученное выражение (12) в уравнение (7):

$$M = A_1 e^{k_1 t} + A_2 e^{k_2 t} + A_3 (1 - e^{k_1 t} - e^{k_2 t}). \quad (13)$$

Принимаем равномерное распределение параметра и получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} M_1 = A_1 + A_2 + A_3 \\ M_2 = A_1 e^{\frac{k_1}{2}} + A_2 e^{\frac{k_2}{2}} + A_3 e^{\left(1 - \frac{k_1}{2} - \frac{k_2}{2}\right)} \\ M_3 = A_1 e^{k_1} + A_2 e^{k_2} + A_3 e^{(1 - k_1 - k_2)}. \end{cases} \quad (14)$$

Решим эту систему экспоненциальных уравнений (14) относительно неизвестных точек симплекса A_1, A_2, A_3 и подставим полученные выражения в уравнение (13). После преобразований получим

точечное уравнение экспоненциальной интерполяционной кривой при условии $e^{k_1 t} + e^{k_2 t} + e^{k_3 t} = 1$:

$$M = \frac{-e^{\frac{k_1 + k_2}{2}} + e^{\frac{k_2 + k_1}{2}} - e^{k_2 t + k_1} + e^{k_1 t + k_2} + e^{\frac{k_1 + k_2}{2}} - e^{\frac{k_1 + k_2}{2}}}{e^{\frac{k_1 + k_2}{2}} - e^{\frac{k_1 + k_2}{2}} - e^{k_1} + e^{k_2} + e^{\frac{k_1}{2}} - e^{\frac{k_2}{2}}} M_1 +$$

$$+ \frac{e^{k_2 t + k_1} - e^{k_1 t + k_2} + e^{k_1 t} - e^{k_2 t} - e^{k_1} + e^{k_2}}{e^{\frac{k_1 + k_2}{2}} - e^{\frac{k_1 + k_2}{2}} - e^{k_1} + e^{k_2} + e^{\frac{k_1}{2}} - e^{\frac{k_2}{2}}} M_2 +$$

$$+ \frac{e^{\frac{k_1 + k_2}{2}} - e^{\frac{k_2 + k_1}{2}} - e^{k_1 t} + e^{k_2 t} + e^{\frac{k_1}{2}} - e^{\frac{k_2}{2}}}{e^{\frac{k_1 + k_2}{2}} - e^{\frac{k_1 + k_2}{2}} - e^{k_1} + e^{k_2} + e^{\frac{k_1}{2}} - e^{\frac{k_2}{2}}} M_3. \quad (15)$$

Рассмотрим пример использования точечного уравнения (15) для моделирования интерполяционной кривой, проходящей через узлы $M_1(1;2)$, $M_2(2;3)$, $M_3(4;1)$ и значения коэффициентов формы кривой $k_1=0,5$, $k_2=2,5$. В результате получим следующую систему параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x = 0,180846868e^{2,5t} - \\ -2,48477042e^{-0,5t} + 3,303923558 \\ y = -0,411511416e^{2,5t} - \\ -9,15376006e^{-0,5t} + 11,56527147. \end{cases} \quad (16)$$

Выполним визуализацию полученной геометрической модели экспоненциальной кривой (сплошная линия) в сравнении с параболической (штриховая линия), используя вышеописанные координаты узлов интерполяции (рис. 2).

Исследуем характер изменения формы полученной кривой при различных значениях k_1 , k_2 . При этом используются следующие узлы интерполяции: $M_1(1;2)$, $M_2(2;3)$, $M_3(4;1)$. Результаты представлены в табл. 2.

Анализируя результаты исследований, некоторые примеры которых представлены в табл. 2, можно сделать следующие выводы:

1. В отличие от экспоненциальной кривой, не принадлежащей симплексу исходных точек A_1 , A_2 , A_3 , полученная кривая не обладает гибкостью для обеспечения точек перегиба.

2. При небольших положительных или смешанных (один коэффициент положительный, второй — отрицательный) значениях коэффициентов больше единицы наблюдается монотонная кривая.

3. При отрицательных значениях коэффициентов кривая имеет осцилляцию, стремящуюся к оси Оу. Чем выше значения коэффициентов, тем больше осцилляция.

4. При положительных значениях коэффициентов кривая имеет осцилляцию, стремящуюся к оси Ох. Чем выше значения коэффициентов, тем больше осцилляция.

5. При больших значениях коэффициентов с разными знаками кривая спрямляется. Чем выше значение коэффициентов, тем выше степень спрямления, длина кривой стремится к минимуму.

6. При небольших дробных значениях коэффициентов с разными знаками кривая с высокой точностью аппроксимирует параболическую интерполяционную кривую, которая определяется уравнением (6).

Следует отметить, что метод замены симплекса в уравнении кривой не ограничивается примером с тремя узлами интерполяции. Подобным образом можно получить точечные и параметрические уравнения с любым количеством узлов интерполяции для построения единой непрерывной кривой.

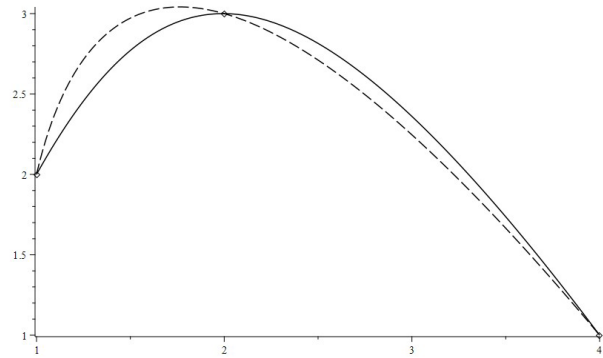


Рис. 2. Экспоненциальная интерполяционная кривая при $e^{k_1 t} + e^{k_2 t} + e^{k_3 t} = 1$

Fig. 2. Exponential interpolation curve for $e^{k_1 t} + e^{k_2 t} + e^{k_3 t} = 1$

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

В качестве примера рассмотрим моделирование кривой, проходящей через 6 узлов интерполяции: $M_1(0;0)$, $M_2(20;0)$, $M_3(40;-47)$, $M_4(55;335)$, $M_5(80;26)$, $M_6(100;387)$ при двух условиях $\sum_{i=1}^6 e^{k_i t} = 1$ и $\sum_{i=1}^6 e^{k_i t} \neq 1$.

В первом случае при $\sum_{i=1}^6 e^{k_i t} = 1$ и коэффициентах формы $k_1 = -0,02$, $k_2 = -0,04$, $k_3 = -0,06$, $k_4 = -0,08$, $k_5 = -0,1$, $k_6 = -0,12$ получим систему параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x = -1 - 3,8 \cdot 10^{11} e^{0,12t} + 3,99 \cdot 10^{11} e^{0,08t} - 1,98 \cdot 10^{12} e^{0,04t} + \\ + 3,92 \cdot 10^{12} e^{0,06t} - 3,88 \cdot 10^{12} e^{0,02t} + 1,92 \cdot 10^{12} e^{0,1t} \\ y = -1 + 3,1 \cdot 10^{13} e^{0,12t} - 3,26 \cdot 10^{13} e^{0,08t} + 1,61 \cdot 10^{14} e^{0,04t} - \\ - 3,19 \cdot 10^{14} e^{0,06t} + 3,16 \cdot 10^{14} e^{0,02t} - 1,57 \cdot 10^{14} e^{0,1t}. \end{cases} \quad (17)$$

Во втором случае при $\sum_{i=1}^6 e^{k_i t} \neq 1$ и коэффициентах формы $k_1 = -0,3$, $k_2 = -0,15$, $k_3 = -0,075$, $k_4 = -0,0375$, $k_5 = -0,01875$ получим:

$$\begin{cases} x = -2,1 \cdot 10^{11} e^{0,01875t} + 1,95 \cdot 10^{11} e^{0,0375t} - 5,58 \cdot 10^{10} e^{0,075t} + \\ + 5,77 \cdot 10^9 e^{0,15t} - 1,79 \cdot 10^8 e^{0,3t} + 6,51 \cdot 10^{10} \\ y = 1,71 \cdot 10^{13} e^{0,01875t} - 1,59 \cdot 10^{13} e^{0,0375t} + 4,55 \cdot 10^{12} e^{0,075t} - \\ - 4,7 \cdot 10^{11} e^{0,15t} + 1,46 \cdot 10^{10} e^{0,3t} - 5,3 \cdot 10^{12}. \end{cases} \quad (18)$$

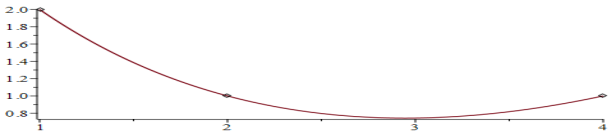
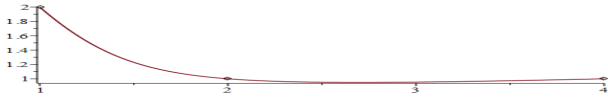
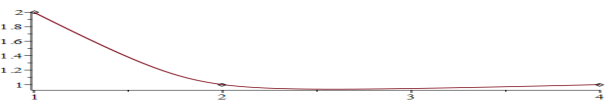
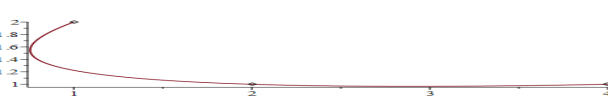
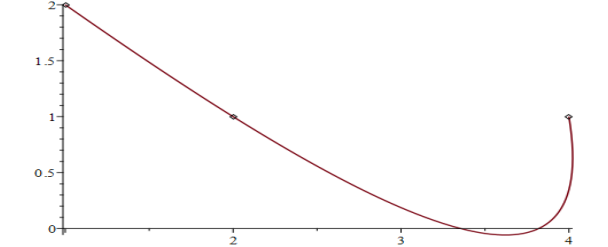
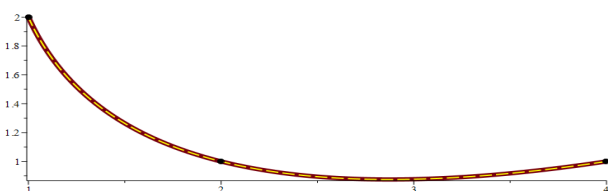
Визуализация экспоненциальных кривых (показаны сплошной линией) в сравнении с классической интерполяционной кривой (показана штриховой линией), которая описывается следующим уравнением с двумя разными условиями, представлена на рис. 3:

$$y = 0,000012x^5 - 0,003008x^4 + 0,2467x^3 - 7,947677x^2 + 82,3237x. \quad (19)$$

Близкий к первому случаю результат (при $\sum_{i=1}^n e^{k_i t} \neq 1$) даёт симметричное задание коэффициентов формы $k_1 = 2,4$, $k_2 = 2$, $k_3 = 1,6$, $k_4 = -1,6$, $k_5 = -2$, $k_6 = -2,4$ для тех же узлов интерполяции (рис. 4):

$$\begin{cases} x = -113314,51e^{-2t-1} + 16404,75e^{2t-1} + 18418,74e^{-2,4t} + \\ + 24169,97e^{-1,6t} - 5117,26e^{1,6t} - 1819,34e^{2,4t} - 1 \\ y = 9,16 \cdot 10^6 e^{-2t-1} - 1,35 \cdot 10^6 e^{2t-1} - 1,49 \cdot 10^6 e^{-2,4t} - \\ - 1,96 \cdot 10^6 e^{-1,6t} + 423723,46e^{1,6t} + 149619,91e^{2,4t} - 1. \end{cases} \quad (20)$$

Таблица 2. Исследование экспоненциальной интерполяционной кривой при различных значениях k_1, k_2
Table 2. Research of the exponential interpolation curve for different values of k_1, k_2

№ п/п	k_1	k_2	Экспоненциальная кривая	
			График функции	Примечания
1	1	2		Монотонная кривая без петель и точек перегиба
2	-4	2		Монотонная кривая без петель и точек перегиба
3	4	-4		Монотонная кривая без петель и точек перегиба
4	-2	-3		Кривая имеет осцилляцию, стремящуюся к оси Oу
5	7	3		Кривая имеет осцилляцию, стремящуюся к оси Oх
6	7	-7		Спряmlенная кривая
7	0,1	-0,1		Экспоненциальная кривая (сплошная линия) совпадает с параболической (штриховая)

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

В результате на данном этапе исследований можно сформулировать следующие рекомендации по выбору коэффициентов формы предложенных экспоненциальных интерполяционных кривых k_i :

1. Для минимизации осцилляций между узлами интерполяции все коэффициенты k_i должны быть близкими к нулю.

2. Для минимизации осцилляций между узлами интерполяции можно использовать симметричные относительно нуля коэффициенты k_i . Поскольку положительные значения k_i дают экспоненциальный рост, а отрицательные — экспоненциальное затухание, при симметричном расположении узлов обеспечивается баланс между ростом и затуханием. В результате получается классический симметричный относительно нуля набор коэффициентов, который аппроксимирует гиперболические функции

$$\cos h(kt) = \frac{e^{kt} + e^{-kt}}{2}, \quad \sin h(kt) = \frac{e^{kt} - e^{-kt}}{2}.$$

3. При высоких значениях коэффициентов k_i происходит спрямление кривой.

4. При наличии резких скачков между узлами интерполяции полностью устранить осцилляции с помощью экспоненциальной модели невозможно. Это фундаментальное ограничение, связанное с глобальным характером экспоненциального базиса.

Заключение

В исследовании предложен новый класс интерполяционных кривых, на основе экспоненциальных функций обеспечивающих инцидентность заданным точкам. Получены точечные уравнения экспоненциальных интерполяционных кривых с различными условиями принадлежности кривой симплексу исходных точек. Визуально исследовано влияние коэффициентов k_i на форму кривой (подтверждено наличие осцилляций, точек перегиба, спрямления и т. д.).

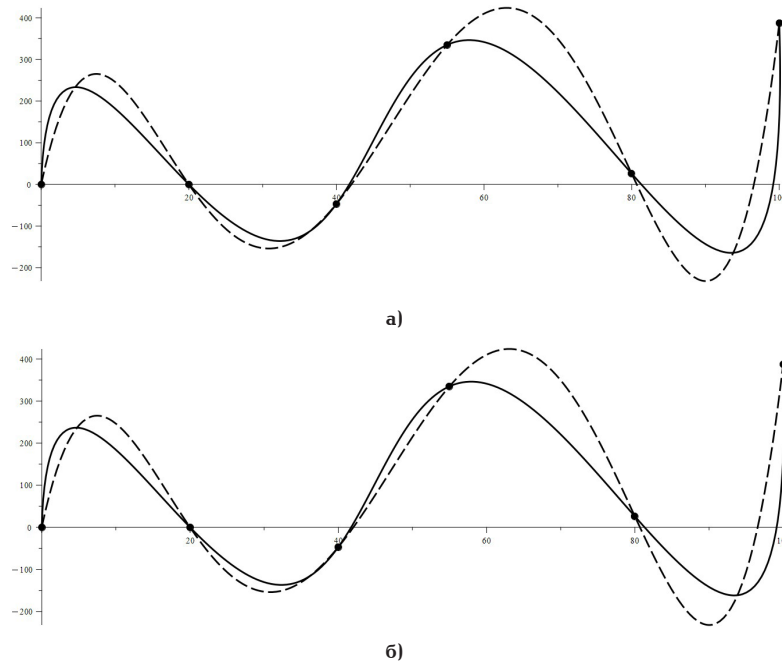


Рис. 3. Экспоненциальная кривая, проходящая через 6 узлов интерполяции:

а) при условии $\sum_{i=1}^n e^{k_i t} \neq 1$; б) при условии $\sum_{i=1}^n e^{k_i t} = 1$

Fig. 3. Exponential curve passing through 6 interpolation nodes:

а) subject to $\sum_{i=1}^n e^{k_i t} \neq 1$; б) subject to $\sum_{i=1}^n e^{k_i t} = 1$

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

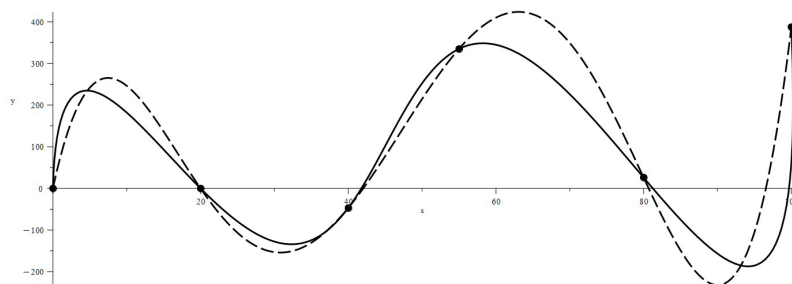


Рис. 4. Экспоненциальная кривая, проходящая через 6 узлов интерполяции при симметричном задании коэффициентов формы k_i

Fig. 4. Exponential curve passing through 6 interpolation nodes with symmetrical assignment of k_i shape coefficients

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Несомненно, на форму кривой значительное влияние оказывают не только коэффициенты k_i , но и координаты узлов интерполяции. Однако наличие дополнительных коэффициентов формы позволяет обеспечить дополнительную гибкость кривой. Таким образом, перспективой дальнейших исследований является разработка геометрически обоснованных рекомендаций по выбору коэффициентов формы k_i . Здесь возможны два принципиально разных направления. Первое — использование единых экспоненциальных кривых, обладающих особыми геометрическими свойствами (минимальной длиной, минимальной кривизной и т. д.) посредством решения минимаксных задач над коэффициентами k_i . Второе — разработка алгоритма моделирования составных кривых, которые на каждом участке имеют своё экспоненциальное уравнение. При этом предложенные интерполяционные экспоненциальные кривые позволяют уменьшить кусочность составной кривой, поскольку охватывают сразу не-

сколько узлов интерполяции, а выбор коэффициентов формы k_i позволит обеспечить необходимый порядок гладкости в точках стыковки.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что полученные кривые расширяют библиотеку геометрических примитивов в системах автоматизированного проектирования и информационного моделирования, позволяя более точно описывать объекты и процессы с экспоненциальными характеристиками на всех этапах жизненного цикла изделия — от концептуального проектирования до моделирования физических процессов (например, деформаций, температурных полей). Также они могут найти своё применение при моделировании процессов в биологии, социологии, экономике. В строительстве кривые могут использоваться для оценки и прогнозирования прироста критических значений (нагрузки, теплового воздействия и других процессов, которые имеют экспоненциальную природу).

1. Бойков А. А., Сиднев П. С. Экспериментальная проверка конструктивных алгоритмов построения кубических парабол при помощи кривых Безье в САПР «Компас-3D» // Журнал естественнонаучных исследований. 2022. Т. 7, № 3. С. 57–64. EDN: GKHYFT.
- Boykov A. A., Sidnev P. S. Experimental verifying of constructive algorithms to create cubic parabolas via Bezier curves in "Kompas-3D" CAD. *Journal of Natural Sciences Research*. 2022;7(3):57–64. EDN: GKHYFT. (In Russ.).
2. Короткий В. А. Конструктивные алгоритмы формирования составных кубических кривых Безье в пространстве и на плоскости // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 10–16. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-182-10-16>. EDN: ZAYBGU.
- Korotkii V. A. Constructive algorithms for forming compound cubic Bezier curves in space and on plane. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022;2(182):10–16. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-182-10-16>. EDN: ZAYBGU. (In Russ.).
3. Панчук К. Л., Мясоедова Т. М. Описание дискретно заданного плоского контура составной линией из дробно-рациональных кривых Безье второго порядка // Программные системы и вычислительные методы. 2019. № 3. С. 49–60. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2019.3.30637>. EDN: SYKZXG.
- Panchuk K. L., Myasoedova T. M. Description of a discretely defined flat contour with a composite line of rational second-order Bezier curves. *Software Systems and Computational Methods*. 2019;3:49–60. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2019.3.30637>. EDN: SYKZXG. (In Russ.).
4. Короткий В. А. Кубические В-сплайны: практическое применение // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2024. Т. 21, № 1 (235). С. 12–21. <https://doi.org/10.14489/vkit.2024.01.pp.012-021>. EDN: VICPTC.
- Korotkii V. A. Cubic B-splines: Practical application. *Herald of Computer and Information Technologies*. 2024;1(235):12–21. <https://doi.org/10.14489/vkit.2024.01.pp.012-021>. EDN: VICPTC. (In Russ.).
5. Николаев П. М. Повышение эффективности расчета В-сплайнов в задачах параллельного программирования // Программная инженерия. 2021. Т. 12, № 5. С. 267–273. <https://doi.org/10.17587/prin.12.267-273>. EDN: AMXXPF.
- Nikolaev P. M. Improving the efficiency of calculating B-splines in parallel programming tasks. *Software Engineering*. 2021;12(5):267–273. <https://doi.org/10.17587/prin.12.267-273>. EDN: AMXXPF. (In Russ.).
6. Guo Y., Niu W., Liu H. [et al.]. NURBS curve interpolation strategy for smooth motion of industrial robots. *Mechanism and Machine Theory*. 2025;205:105885. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2024.105885>. EDN: KFLFKU.
7. Fadhel M., Omar Z. Geometric piecewise cubic Bézier interpolating polynomial with C2 continuity. *Informatics and Automation*. 2021;20(1):133–159. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.1.5>. EDN: UMURSQ.
8. Горавнева Т. С. Способы моделирования кривых применительно к САПР // Современные научные исследования и инновации. 2022. № 3 (131). С. 7. EDN: VIOTBT.
- Goravneva T. S. Sposoby modelirovaniya krivykh primenitel'no k SAPR. *Modern Scientific Researches and Innovations*. 2022;3(131):7. EDN: VIOTBT. (In Russ.).
9. Подколзин В. В., Уварова А. В. Линейно-квадратичная интерполяция // Вестник СибГУТИ. 2020. № 1 (49). С. 11–19. EDN: RXMAQQ.
- Podkolzin V. V., Uvarova A. V. Linear-quadratic interpolation. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2020;1(49):11–19. EDN: RXMAQQ. (In Russ.).
10. Яксубаев К. Д., Аксютин И. В. Комплексный интерполяционный многочлен Лагранжа // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2024. № 4 (50). С. 122–126. <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2024-50-4-122-126>. EDN: HRBYSQ.
- Yaksubaev K. D., Aksyutina I. V. Complex interpolation Lagrange polynomial. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2024;4(50):122–126. <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2024-50-4-122-126>. EDN: HRBYSQ. (In Russ.).
11. Косников Ю. Н., Абубекеров Д. Р. О приведенных погрешностях интерполяции неаналитических кривых // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 93. С. 156–167. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2025-93-156-167>. EDN: QOXXTZ.
- Kosnikov Yu. N., Abubekеров D. R. About the reduced interpolation errors of non-analytical curves. *Vestnik of RSREU*. 2025;93:156–167. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2025-93-156-167>. EDN: QOXXTZ. (In Russ.).
12. Гайсин Р. А. Интерполяционные последовательности и неполные системы экспонент на кривых // Математический сборник. 2021. № 5 (212). С. 58–79. <https://doi.org/10.4213/sm9370>. EDN: ZWHAAC.
- Gaisin R. A. Interpolation sequences and nonspanning systems of exponentials on curves. *Sbornik: Mathematics*. 2021;5(212):58–79. <https://doi.org/10.4213/sm9370>. EDN: ZWHAAC. (In Russ.).
13. Балюба И. Г., Найдыш А. В., Конопацкий Е. В. [и др.]. Теоретические основы точечного исчисления как математического аппарата геометрического и компьютерного моделирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2023. Т. 20, № 2 (224). С. 3–15. <https://doi.org/10.14489/vkit.2023.02.pp.003-015>. EDN: ZULQCQ.
- Balyuba I. G., Naidysh A. V., Konopatskiy E. V. [et al.]. Theoretical foundations of the point calculus as a mathematical apparatus for geometric and computer modeling. *Herald of Computer and Information Technologies*. 2023;20(2):3–15. <https://doi.org/10.14489/vkit.2023.02.pp.003-015>. EDN: ZULQCQ. (In Russ.).
14. Конопацкий Е. В. Моделирование геометрических объектов в точечном исчислении: монография. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. 197 с. ISBN 978-5-528-00636-9. EDN: GMVGUV.
- Konopatskiy E. V. Modelirovaniye geometricheskikh obyektov v tochechnom ischislenii. Nizhniy Novgorod, 2025. 197 p. ISBN 978-5-528-00636-9. EDN: GMVGUV. (In Russ.).
15. Конопацкий Е. В. Геометрическое моделирование многофакторных процессов на основе точечного исчисления: дисс. ... докт. техн. наук. Нижний Новгород, 2020. 307 с. EDN: AQEYNO.
- Konopatskiy E. V. Geometricheskoye modelirovaniye mnogofaktornykh protsessov na osnove tochechnogo ischisleniya. Nizhniy Novgorod, 2020. 307 p. EDN: AQEYNO. (In Russ.).

Вклад авторов:

А. В. Степура. Обзор отечественных и зарубежных источников, выявление недостатков существующих методов, сравнение с альтернативными подходами параметризации интерполяционных кривых, использование метода для построения интерполяционных кривых на основе экспоненциальных функций, проведение вычислительных экспериментов с визуализацией результатов исследований, исследование экспоненциальной интерполяционной кривой при различных значениях коэффициентов формы.

Е. В. Конопацкий. Постановка цели, задач исследований и научной проблемы, разработка метода моделирования интерполяционных кривых на основе кривых Безье, обобщение метода моделирования интерполяционных кривых на экспоненциальные функции, разработка математического аппарата, общее редактирование текста, формулировка выводов.

Authors' contribution:

Anna V. Stepura. Reviewing of domestic and foreign sources, identification of shortcomings of existing methods, comparison with alternative approaches to parameterization of interpolation curves, use of the method for constructing interpolation curves based on exponential functions, conducting computational experiments with visualization of research results, study of the exponential interpolation curve for different values of shape coefficients.

Evgeniy V. Konopatskiy. Setting the goal, research objectives and scientific problem, developing a method for modeling interpolation curves based on Bezier curves, generalizing the method for modeling interpolation curves to exponential functions, developing the mathematical apparatus, general editing of the text, formulating conclusions.

Информация об авторах:

СТЕПУРА Анна Вячеславовна, старший преподаватель кафедры «Инженерная графика и компьютерное моделирование» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва.

SPIN-код: 4586-7096

AuthorID (РИНЦ): 1251696

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-329X>

AuthorID (SCOPUS): 60074430200

e-mail: stepuraAV@mgsu.ru

КОНОПАЦКИЙ Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе и цифровому развитию Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 4566-6208

AuthorID (РИНЦ): 681553

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4798-7458>

AuthorID (SCOPUS): 57188826034

ResearcherID: D-3235-2019

e-mail: e.v.konopatskiy@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в пред-

ставленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 23.03.2026; одобрена после рецензирования 15.06.2026; принята к публикации 14.08.2026.

Information about the authors:

STEPURA Anna Vyacheslavovna, Senior Lecturer of the Engineering Graphics and Computer Modeling Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow.

SPIN-code: 4586-7096

AuthorID (RSCI): 1251696

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-329X>

AuthorID (SCOPUS): 60074430200

e-mail: e.v.konopatskiy@mail.ru

KONOPATSKIY Evgeniy Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice Rector for Research and Digital Development, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod.

SPIN-code: 4566-6208

AuthorID (RSCI): 681553

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4798-7458>

AuthorID (SCOPUS): 57188826034

ResearcherID: D-3235-2019

e-mail: e.v.konopatskiy@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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 23.03.2026; approved after reviewing 15.06.2026; accepted for publication 14.08.2026.

ПРИМЕНЕНИЕ CORSIA НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

А. В. Рыбьяков✉, О. Г. Феоктистова, И. Н. Мерзликин

Московский государственный технический университет гражданской авиации,
Россия, 125493, г. Москва, бул. Кронштадтский, 20

✉ rybiakov@bk.ru

В статье рассматривается процесс адаптации российской гражданской авиации к требованиям глобальной схемы компенсации и сокращения выбросов CORSIA в условиях санкционных ограничений, действующих с 2022 г.

Анализируется текущее состояние подготовки России к реализации механизмов углеродного регулирования с учётом переориентации международных воздушных перевозок на рынки Глобального Юга, закрытия воздушного пространства недружественных государств и ограничений на поставку авиационной техники. Особое внимание уделено техническим аспектам создания национальной системы мониторинга, отчётности и верификации, совместимой с требованиями как Международной организации гражданской авиации, так и потенциальных партнёров по БРИКС и ШОС. Обсуждаются правовые риски участия российских авиакомпаний в CORSIA и перспективы формирования альтернативных механизмов углеродного учёта.

Сделан вывод о необходимости разработки суверенной методологии оценки экологического воздействия авиации, опирающейся на отечественные научные школы и нормативную базу.

Ключевые слова: CORSIA, углеродное регулирование, авиация, санкции, устойчивое авиационное топливо, БРИКС

Для цитирования: Рыбьяков А. В., Феоктистова О. Г., Мерзликин И. Н. Применение CORSIA на территории России // Омский научный вестник. 2026. № 3 (199). С. 66–72. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-66-72>. EDN: YTHSXT.



© Рыбьяков А. В., Феоктистова О. Г., Мерзликин И. Н., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

CORSIA APPLICATION IN RUSSIA

A. V. Rybiakov✉, O. G. Feoktistova, I. N. Merzlikin

Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Kronshtadtsky Blvd., 20, Moscow, 125493, Russia

✉ rybiakov@bk.ru

The article examines the process of adaptation of Russian civil aviation to the requirements of the Global Emissions Compensation and Reduction Scheme CORSIA in the context of sanctions restrictions since 2022.

The authors analyse the current state of Russian preparations for the implementation of carbon regulation mechanisms considering the reorientation of international air transportation to the markets of the Global South, the closure of the airspace of unfriendly states and restrictions on the supply of aviation equipment. Special attention is paid to the technical aspects of creating a national monitoring, reporting and verification system compatible with the requirements of both International Civil Aviation Organization and potential BRICS and SCO partners. The legal risks of Russian airlines' participation in CORSIA and the prospects for the formation of alternative carbon accounting mechanisms are discussed.

Therefore, it is necessary to develop a sovereign methodology for assessing the environmental impact of aviation based on domestic scientific schools and the regulatory framework.

Keywords: CORSIA, carbon regulation, aviation, sanctions, sustainable aviation fuel, BRICS



Введение

Глобальная схема компенсации и сокращения выбросов в международной авиации (CORSIA — Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), принятая в 2016 г. на 39-й Ассамблее Международной организации гражданской авиации (ИКАО), представляет собой первый отраслевой рыночный механизм стабилизации выбросов CO₂ [1]. Это решение стало результатом многолетних переговоров между государствами-членами ИКАО и отражает компромисс между принципами общих, но дифференцированных ответственностей и справедливого участия [2].

Цель CORSIA — стабилизировать чистые выбросы CO₂ от международных полетов на уровне 2020 г. посредством системы мониторинга, отчетности, верификации и последующей компенсации роста выбросов [3]. С 2021 г. схема находится в фазе пилотного этапа, а с 2027 г. переходит в обязательную фазу, в которой формально участвуют все государства-члены ИКАО, включая Российскую Федерацию, страны Азии и Африки, за исключением некоторых стран с низким уровнем авиационных перевозок [4].

Россия как одна из крупнейших авиационных держав мира играет ключевую роль в международных воздушных перевозках, особенно в классических транзитных маршрутах между Европой и Азией, которые в настоящий момент используют только авиакомпании Азии [5]. Благодаря обширной территории и ключевому положению на воздушных трассах между Европой и Азией Россия обладает уникальным потенциалом для участия в трансграничных климатических инициативах. Однако геополитическая ситуация, радикально изменившаяся после февраля 2022 г., поставила под вопрос традиционный подход к реализации CORSIA в России. Сейчас в отношении Российской Федерации введено более 30 000 санкций, в том числе закрытие воздушного пространства стран ЕС, США, Канады для российских перевозчиков и ответное закрытие российского неба для авиакомпаний недружественных государств; экспортные ограничения на авиационную технику и запчасти; финансовые санкции против авиакомпаний и лизингодателей. Всё это требует принципиально нового взгляда на проблему углеродного регулирования в авиации.

В этих условиях задача исследования смещается от формального «внедрения CORSIA» к разработке суверенной методологии оценки экологического воздействия авиации, способной:

- обеспечить техническую готовность российской авиации к любому сценарию международного взаимодействия;
- служить основой для диалога с партнёрами по БРИКС, ШОС и другими странами Глобального Юга [6];
- поддерживать внутреннюю политику декарбонизации отрасли в условиях технологического суверенитета.

Цель статьи — провести анализ текущего состояния подготовки России к углеродному регулированию в авиации с учётом санкционных ограничений, выявить технические и правовые барьеры, а также предложить направления развития отечественной системы мониторинга выбросов.

Общая характеристика CORSIA

CORSIA представляет собой добровольно-обязательный механизм, основанный на принципах справедливости, прозрачности и эквивалентности мер. Базовыми элементами схемы CORSIA являются: определение базового уровня в 2019–2020 гг. (учет пандемийных искажений стал критически важным, поскольку резкое падение авиационных перевозок в 2020 г. могло бы искусственно понизить базовый уровень, что привело бы к необоснованно высоким компенсационным обязательствам в будущем [7]); создание MRV-модели (мониторинг, отчетность и верификация (MRV) — обязательное ежегодное измерение и подтверждение выбросов CO₂ от международных полетов [8]).

Важным элементом CORSIA является также возможность покупки компенсационных единиц — авиакомпаниям должны приобретать сертифицированные углеродные кредиты для компенсации роста выбросов относительно базового уровня. Важно подчеркнуть, что только те углеродные кредиты, которые соответствуют строгим критериям ИКАО, включая дополнительную, долгосрочность и отсутствие двойного учета, могут быть использованы в рамках CORSIA. Таким образом, сертификация проектов является рычагом контроля ИКАО, так как в схеме CORSIA в компенсации могут участвовать только сертифицированные ИКАО проекты (например, лесовосстановление, энергоэффективность). Процесс одобрения проектов включает многоэтапную экспертизу, направленную на предотвращение «зеленого камуфляжа» и обеспечение реального климатического эффекта [9].

CORSIA охватывает международные полеты между участвующими странами, а внутренние рейсы остаются вне зоны действия CORSIA, что создает дополнительные сложности при разделении данных и расчете доли компенсируемых выбросов. В 2024 г. в схеме участвовало более 130 государств, включая страны ЕС, США, Китай, Канаду и большинство стран Азии и Латинской Америки. Следовательно, подавляющее большинство мирового международного авиационного трафика уже подпадает под действие схемы, делая участие в ней практически обязательным для любого авиаперевозчика. Россия, несмотря на членство в ИКАО, до сих пор не представила полной национальной программы MRV.

Анализ текущего состояния: новая реальность российской авиации

Адаптация схемы CORSIA к текущим российским реалиям осложняется фундаментальными изменениями в глобальной авиационной системе,

которые произошли после февраля 2022 г. В этих условиях вопросы углеродного регулирования неразрывно связаны с задачами технологического обеспечения отрасли и ее устойчивостью к внешним ограничениям [10].

Ключевым механизмом CORSIA является привязка компенсационных обязательств к базовому уровню выбросов 2019–2020 гг. Однако для российской авиации этот базовый уровень фактически утратил смысл. Закрытие воздушного пространства стран ЕС, США, Канады и ответное закрытие неба России для недружественных государств привели к полной перекройке маршрутной сети [11].

Транзитные потоки, формировавшие значительную долю выбросов на европейских направлениях, сместились на юг и восток. Основные международные рейсы российских перевозчиков теперь ориентированы на Турцию, ОАЭ, Египет, Таиланд, Индию и Китай. Смена вектора международных перевозок объективно снижает прямые риски попадания под санкции CORSIA, поскольку схема применяется только к рейсам между странами-участницами. Если государство назначения не участвует в обязательной фазе CORSIA, которая стартует в 2027 г., или имеет собственные, отличные от ИКАО механизмы регулирования, компенсационные обязательства по таким маршрутам для российских авиакомпаний не возникают. Таким образом, переориентация на рынки Глобального Юга объективно выводит значительный массив международных полетов российской авиации из-под действия западных углеродных регуляторов.

Введение более 30 000 санкций, включая прямые запреты на поставки авиационной техники, комплектующих и авиакими, создало критические вызовы для технической эксплуатации. Прекращение поддержки со стороны Boeing и Airbus, уход западных лизингодателей и запрет на страхование и перестрахование вынудили отрасль перейти к политике «каннибализации» парка и продления ресурса эксплуатируемых воздушных судов (ВС) за счет использования неоригинальных запчастей и альтернативных процедур технического обслуживания и ремонта (MRO) [12].

Указанные факторы напрямую влияют на экологию. Применение нештатных герметиков и отсутствие оригинальных лопаток двигателей приводят к деградации аэродинамических характеристик и увеличению зазоров. Наряду с упрощением процедур ТО данный факт провоцирует рост удельного расхода керосина. Применение жестких углеродных нормативов к авиакомпаниям, решающим задачи поддержания летной годности существующего парка, вступает в противоречие с фактическими технологическими возможностями отрасли [13].

Финансовые санкции разорвали логистические цепочки поставок устойчивого авиационного топлива (SAF). Если на Западе CORSIA стимулирует спрос на SAF через механизм углеродных кредитов, то в России закупка биотоплива блокируется отсутствием как внутреннего производства, так и возможности легально импортировать его из-за сложностей с трансграничными платежами и логистикой [14].

Кроме того, уход западных страховых компаний и классификационных обществ кардинально изменил подход к оценке рисков, в том числе экологических. В случае аварийной ситуации, сопровождающейся разливом авиакеросина (особенно в уязвимых экосистемах Арктики и Сибири), использование зарубежных методик оценки экологи-

ческого ущерба становится не просто бессмысленным, но и юридически ничтожным.

Вывод о том, что Россия должна в одностороннем порядке наложить на себя дополнительные углеродные ограничения, чтобы идти в ногу с развитыми экономиками Запада, в текущих условиях несостоятелен. Участие в CORSIA в его нынешнем виде предполагает покупку углеродных единиц на платформах, контролируемых недружественными юрисдикциями (Verra, Gold Standard), что создает неприемлемые валютные и репутационные риски, а также угрозу утечки данных о реальной структуре российской авиационной отрасли [15].

Вместо интеграции в западную систему углеродного регулирования Россия должна форсировать создание суверенной национальной системы мониторинга, отчетности и верификации (MRV), гармонизированной не с директивами ЕС, а с интересами партнеров по БРИКС и ШОС. XVI саммит БРИКС в Казани четко обозначил курс на формирование альтернативных финансовых и климатических механизмов. Обладая крупнейшими в мире лесными массивами и потенциалом для генерации углеродных единиц за счет климатических проектов, Россия может предложить странам Глобального Юга (Китаю, Индии, ОАЭ) двусторонние механизмы признания углеродных единиц, полностью исключив из этой цепочки западных верификаторов.

Таким образом, применение CORSIA на территории России сегодня должно трактоваться не как слепое копирование методологии ИКАО, а как создание отечественного инструмента экологического учета [16]. Этот инструмент должен учитывать реальную структуру парка, фактические маршруты полетов, технологические ограничения в обслуживании ВС и опираться исключительно на верифицированные российские научные школы и нормативную базу.

Технические аспекты создания национальной системы MRV

Система мониторинга, отчетности и верификации (MRV) является техническим ядром CORSIA [9]. Методология расчёта выбросов CO₂ основана на формуле:

$$E = M_{fuel} \cdot EF,$$

где E — масса выбросов CO₂, кг; M_{fuel} — масса сожжённого топлива, кг; EF — коэффициент эмиссии (3,15 кг CO₂/кг авиационного топлива согласно методологии ИКАО).

Для построения корпоративной подсистемы MRV авиакомпаниям необходимо внедрить автоматизированный сбор данных о расходе топлива (с интеграцией в FMS и бортовые журналы) [17], использовать специализированное ПО для расчетов по методологии Doc 9501, а также выстроить процедуры внутреннего аудита и привлечения независимых верификаторов [18]. На макроуровне технологически возможным решением выступает создание Национальной цифровой платформы MRV, интегрированной с системами Росавиации и Росгидромета. Платформа должна брать на себя автоматизированный прием данных от перевозчиков, их верификацию, в том числе с применением алгоритмов машинного обучения для выявления аномалий, и формирование отчетности, совместимой как с национальными стандартами, так и с требованиями ИКАО.

Отечественная практика мониторинга выбросов в настоящее время не имеет единой стандартизированной базы. Ряд перевозчиков продолжает применять фрагментарные методы учета расхода топлива, вплоть до ручного ввода данных, что неизбежно порождает риски верификационных ошибок [19].

Решение технических задач создания MRV требует привлечения ведущих российских научных организаций:

- ГосНИИ ГА (Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации), который обладает компетенциями в области анализа выбросов и экологической безопасности авиации;

- ЦИАМ (Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова), располагающий методиками расчёта эмиссии авиационных двигателей, которые необходимы для детализации инвентаризации выбросов;

- ЦАГИ (Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского), который обладает компетенциями в области аэродинамической оптимизации, что напрямую связано со снижением расхода топлива и, соответственно, выбросов.

Интеграция компетенций этих организаций в единую методическую базу является необходимым условием для создания суверенной системы MRV [20].

Технологически возможным решением является создание Национальной цифровой платформы MRV, интегрированной с системами Росавиации, Росгидромета и ФГУП «ГосНИИАС». Такая платформа должна обеспечивать:

- автоматизированный сбор и верификацию данных о расходе топлива от всех авиакомпаний;

- формирование отчётности в форматах, совместимых как с требованиями ИКАО, так и с национальными стандартами;

- интеграцию с системами учёта углеродных единиц.

Правовые риски участия в CORSIA

Одним из ключевых правовых рисков является возможность двойного регулирования, когда выбросы российского перевозчика учитываются одновременно в национальной системе и в CORSIA. Это может привести к двойной финансовой нагрузке на отечественные авиакомпании [21].

В Европейском союзе эта проблема решена путём корректировки директивы EU ETS во избежание двойного учёта с CORSIA. В России подобный механизм пока не разработан.

Требования CORSIA предполагают верификацию данных аккредитованными третьими сторонами. В условиях санкций взаимодействие с западными верификаторами затруднено или невозможно. Использование верификаторов из дружественных стран предполагает разработку механизмов взаимного признания, которые пока отсутствуют.

Механизм компенсации CORSIA требует приобретения углеродных кредитов на одобрённых рынках. В условиях санкций доступ к западным платформам торговли ограничен; покупка кредитов в валюте недружественных государств создаёт валютные риски; отсутствие национального реестра климатических проектов делает невозможным генерацию отечественных единиц.

Альтернативные механизмы сотрудничества

В условиях ограничения взаимодействия с западными странами перспективным направлением

является формирование механизмов углеродного учёта в рамках БРИКС и ШОС [22].

Россия, обладая крупнейшими в мире лесными массивами, может стать поставщиком углеродных единиц для стран БРИКС за счёт проектов лесовосстановления в Сибири и на Дальнем Востоке; утилизации метана на месторождениях; внедрения возобновляемых источников энергии. Однако для этого необходима разработка национальной системы учёта углеродного следа, соответствующей не только стандартам ИКАО, но и требованиям потенциальных партнёров [23].

Альтернативой многосторонним механизмам могут стать двусторонние соглашения о взаимном признании систем MRV и углеродных единиц. Такой подход уже реализуется в некоторых регионах мира и может быть адаптирован для сотрудничества России с Китаем, Индией, ОАЭ и другими партнёрами [24].

Роль устойчивого авиационного топлива (SAF)

CORSIA — это в первую очередь механизм компенсации, а не сокращения выбросов. Его экологическая эффективность зависит от качества и достоверности компенсационных проектов [25].

Кроме того, долгосрочная декарбонизация авиации невозможна без перехода на альтернативное устойчивое авиационное топливо (SAF). Технологические решения, такие как водородные или электрические самолеты пока не готовы к коммерческому применению на магистральных маршрутах, что делает SAF наиболее реалистичным вариантом на ближайшие два десятилетия [26]. В 2023 г. доля SAF в мировом потреблении составила менее 0,2 %. В России производство SAF отсутствует. Первые пилотные проекты (например, на базе Роснефти и Газпром нефти) находятся на стадии НИОКР, но не имеют четких сроков коммерциализации [27].

Для стимулирования производства SAF требуются государственные субсидии и налоговые льготы; квоты на обязательное смешение SAF с традиционным керосином; создание инфраструктуры хранения и доставки SAF.

Государственная поддержка в данном случае выступает катализатором для формирования новой отрасли, способной обеспечить энергетическую безопасность и технологический суверенитет [28]. Стратегические рекомендации по развитию системы углеродного регулирования в гражданской авиации России представлены в табл. 1.

Заключение

Анализ показывает, что традиционный подход к внедрению CORSIA в России до 2022 г. в современных условиях требует принципиального пересмотра. Санкционные ограничения, переориентация международных перевозок и необходимость обеспечения технологического суверенитета формируют новую реальность, в которой приоритетом становится разработка суверенной методологии оценки экологического воздействия авиации.

Вектор дальнейшего развития отрасли определяется, прежде всего, необходимостью выстраивания национальной системы мониторинга, отчётности и верификации выбросов, опирающейся на компетенции ведущих отечественных научных центров — ГосНИИ ГА, ЦИАМ им. П. И. Баранова и ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского. Именно консолидация их заделов в области инвентаризации эмиссии, аэродинамической оптимизации и экологической безопасно-

Таблица 1. Стратегические рекомендации по развитию системы углеродного регулирования в гражданской авиации России [24]
Table 1. Strategic recommendations for the development of carbon regulation in Russian civil aviation [24]

№ п/п	Комплекс мер	Виды мер
1.	Краткосрочные меры (2026 – 2027 гг.)	Разработка и утверждение Порядка мониторинга выбросов парниковых газов в авиации в рамках реализации ФЗ № 296-ФЗ. Создание межведомственной рабочей группы по углеродному регулированию в авиации с участием Росавиации, Минприроды, Минэнерго и ведущих научных организаций (ГосНИИ ГА, ЦИАМ, ЦАГИ). Запуск пилотного проекта цифровой платформы MRV на базе 2–3 крупных авиакомпаний.
2.	Среднесрочные меры (2027 – 2030 гг.)	Создание национального реестра углеродных единиц с механизмом генерации кредитов от лесоклиматических проектов. Разработка национального стандарта SAF и запуск первых промышленных производств. Заключение двусторонних соглашений о взаимном признании систем MRV с ключевыми партнёрами (Китай, Индия, ОАЭ).
3.	Долгосрочные меры (2030 – 2035 гг.):	Интеграция национальной системы MRV в глобальные механизмы углеродного учёта на условиях, обеспечивающих технологический суверенитет России. Формирование регионального рынка углеродных единиц в рамках БРИКС/ШОС. Достижение доли SAF в потреблении авиатоплива на уровне 5–10 %.

сти способна стать методологическим фундаментом для отечественной альтернативы западным схемам учёта. Параллельно требуется формирование механизмов углеродного сотрудничества с партнёрами по БРИКС и ШОС, включая выработку процедур взаимного признания верифицированных единиц сокращения выбросов и создание двусторонних реестров климатических проектов.

Отдельной задачей выступает развитие производства устойчивого авиационного топлива (SAF), которое в долгосрочной перспективе остаётся безальтернативным инструментом декарбонизации магистральных перевозок. При этом в краткосрочной и среднесрочной перспективе не менее значимым направлением научного сопровождения отрасли становится обоснование экологической целесообразности продления ресурса эксплуатируемого парка воздушных судов в условиях ограниченного доступа к новой технике и западным процедурам технического обслуживания. Подобное обоснование, опирающееся на отечественные расчётные методики и данные лётной эксплуатации, способно снять часть противоречий между требованиями экологической отчётности и фактическими технологическими возможностями перевозчиков.

Указанный комплекс мер создаёт предпосылки для того, чтобы российская гражданская авиация сохранила конкурентоспособность на международных рынках, выполнила принятые на себя климатические обязательства и внесла вклад в глобальную повестку устойчивого развития — однако исключительно на тех условиях, которые соответствуют технологическому и экономическому суверенитету Российской Федерации.

Список источников / References

- Sharma A., Jakhar S. K., Choi Ts. M. Would CORSIA implementation bring carbon neutral growth in aviation? A case of US full service carriers. *Transportation Research Part D Transport and Environment*. 2021;97:102839. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102839>. EDN: GKJEW.
- Капогузов Е. А. Импортотависимость российской гражданской авиационной промышленности // Вестник Томского государственного университета. Экономика. 2022. № 58. С. 58 – 76. <https://doi.org/10.17223/19988648/58/4>. EDN: EJADDX.

Капогузов Е. А. Import dependence of the russian civil aviation industry. *Bulletin of Tomsk State University. Economy*. 2022;58:58 – 76. <https://doi.org/10.17223/19988648/58/4>. EDN: EJADDX. (In Russ.).

3. Машарский З. В., Жукова А. А., Суринович Е. А. [и др.]. CORSIA как инструмент регулирования воздействия гражданской авиации на экологическую ситуацию в мире // Авиационный вестник. 2020. № 2. С. 66 – 71. EDN: ETSDRP.

Masharsky Z. V., Zhukova A. A., Surinovich E. A. [et al.]. CORSIA as a tool for regulating the impact of civil aviation on the global environmental situation. *Aviation Bulletin*. 2020;2:66 – 71. EDN: ETSDRP. (In Russ.).

4. Калякина К. А., Калякин А. В., Файзуллин Р. Р., Егоров М. А. Декарбонизация авиаперевозок путем применения устойчивых авиационных топлив (SAF) // Научный вестник УИ ГА. 2022. № 14. С. 37 – 43. EDN: AKNJYP.

Kalyakina K. A., Kalyakin A. V., Faizullin R. R., Egorov M. A. Decarbonization of air transportation through the use of sustainable aviation fuels (SAF). *Scientific Bulletin of the Institute of Aviation*. 2022;14:37 – 43. EDN: AKNJYP. (In Russ.).

5. Махмутова К. А. Сравнительный анализ эффективности деятельности отечественных и зарубежных компаний авиаперевозки // Студенческий вестник. 2024. № 1-8 (287). С. 21 – 26.

Makhmutova K. A. Comparative analysis of the effectiveness of the activities of domestic and foreign companies air transportation. *Studenchesky Vestnik*. 2024;1-8(287):21 – 26. (In Russ.).

6. Рогинко С. А. Система ИКАО CORSIA: новый углеродный рынок для России // Проблемы прогнозирования. 2025. № 6 (213). С. 191 – 204. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-213-191-204>. EDN: LWBCDT.

Roginko S. A. ICAO CORSIA system: a New carbon market for Russia. *Problems of Forecasting*. 2025;6(213):191 – 204. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-213-191-204>. EDN: LWBCDT. (In Russ.).

7. Kaya G., Kayalica Ö. Aviation-caused CO₂ emissions reduction efficiency in EU-28 under CORSIA compliance. *Akilli Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*. 2022;2(5):33 – 52. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1164739>. EDN: UGHYBM.

8. Козлова А. Т., Дмитриева Д. С. Концептуальные основы устойчивого развития экономических систем в авиационной отрасли: международные тенденции и перспективы для России // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 6 (87). С. 395 – 401. EDN: CAMCLI.

Kozlova A. T., Dmitrieva D. S. Conceptual foundations of sustainable development of economic systems in the aviation industry: International trends and prospects for Russia. *Information*

and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2025;6(87):395–401. EDN: CAMCLI. (In Russ.).

9. Tian L., Zhang X., Shao Yu., Qin W. The impact of the CORSIA on CO₂ emissions. *Social Science Research Network*. 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4185455>. EDN: BRXYOM.

10. Охалкин А. А. Оценка потерь российской авиационной отрасли в связи с внедрением Схемы возмещения и сокращения эмиссии углерода для международной авиации (CORSIA) // *Экономическая безопасность*. 2022. Т. 5, № 4. С. 1615–1632. <https://doi.org/10.18334/ecsec.5.4.116288>. EDN: DYTSKC.

Okhapkin A. A. Estimated losses to the Russian aviation industry due to the implementation of the carbon offset and reduction scheme for international aviation (CORSIA). *Economic Security*. 2022;4(5):1615–1632. <https://doi.org/10.18334/ecsec.5.4.116288>. EDN: DYTSKC. (In Russ.).

11. Cao F., Wang J., Wang X. [et al.]. Uncertainty in CORSIA: assessing impacts of BASIC's withdrawal on carbon offsetting. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2026;209:105009. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2026.105009>. EDN: UCVDMR.

12. Лесничий И. В., Самойлов В. И., Кипчарский Д. А. Значение планируемых ужесточений экологических норм ИКАО для авиатранспортной системы России // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2019. № 27. С. 48–55. EDN: QUHRNM.

Lesnichiy I. V., Samoylov V. I., Kipcharskiy D. A. Significance planned tightening of icao environmental standards for the air transport system of Russia. *Scientific Bulletin of the State Research Institute of the Russian Academy of Sciences*. 2019;27:48–55. EDN: QUHRNM. (In Russ.).

13. Донаканян В. Г. «Озеленение» полётов: как экологизация правового регулирования воздушных сообщений влияет на международное воздушное право? // *Международное правосудие*. 2025. Т. 15, № 3 (55). С. 139–165. <https://doi.org/10.21128/2226-2059-2025-3-139-165>. EDN: KOMIVL.

Donakanyan V. G. "Greening" of flights: How does greening the legal regulation of air services affect international air law? *International Justice*. 2025;3(55):139–165. <https://doi.org/10.21128/2226-2059-2025-3-139-165>. EDN: KOMIVL. (In Russ.).

14. Mohammadi H. A., Saddler Ja. A comparison of the life cycle analysis (LCA) models used to determine the carbon intensity of biofuels, Biojet / Sustainable Aviation Fuel (SAF). *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2026;5(31):74. <https://doi.org/10.1007/s11367-026-02647-8>. EDN: YUQUKP.

15. Cao F., Wang J., Wang X. [et al.]. Uncertainty in CORSIA: Assessing impacts of BASIC's withdrawal on carbon offsetting. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2026;209:105009. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2026.105009>. EDN: UCVDMR.

16. Стародомский О. Ю., Самойлов И. А., Лесничий И. В. [и др.]. Оценка влияния повышения требований ИКАО в области авиационной эмиссии на гражданскую авиацию // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2020. № 31. С. 66–75. EDN: KLPKJL.

Starodomsky O. Yu., Samoilov I. A., Lesnichy I. V. [et al.]. Assessment of the impact of increasing ICAO requirements in the field of aviation emissions on civil aviation. *Scientific Bulletin of GosNII GA*. 2020;31:66–75. EDN: KLPKJL. (In Russ.).

17. Феоктистова О. Г., Потапова Д. Ю. Построение прогноза основных показателей работы авиакомпании на основе корреляционного анализа // *Омский научный вестник*. 2021. № 5 (179). С. 15–18. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2021-179-15-18>. EDN: BXAAYM.

Feoktistova O. G., Potapova D. Yu. Using correlation matrices in predicting airline performance. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021;5(179):15–18. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2021-179-15-18>. EDN: BXAAYM. (In Russ.).

18. Абилядинов А. Т., Елубай М. А. Пути снижения углеродного следа авиационного топлива // *Вопросы устойчивого развития общества*. 2022. № 7. С. 940–945. EDN: JHJNWX.

Abildinov A. T., Elubai M. A. Ways to reduce the carbon footprint of aviation fuel. *Issues of Sustainable Development of Society*. 2022;7:940–945. EDN: JHJNWX. (In Russ.).

19. Николайкин Н. И., Смирнова Ю. В., Матягина А. М. О методе оценки экологической эффективности авиатехники с учётом относительной негативности ингредиентов загрязнения // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2006. № 100. С. 42–47. EDN: KWPOHL.

Nikolaykin N. I., Smirnova Yu. V., Matyagina A. M. O metode otsenki ekologicheskoy effektivnosti aviatekhniki s uchptom otnositel'noy negativnosti ingrediyentov zagryazneniya. *Civil Aviation High Technologies*. 2006;100:42–47. EDN: KWPOHL. (In Russ.).

20. Кулаков С. Ю., Базарский О. В. Методика расчета уровня загрязнения атмосферы авиационными двигателями воздушных судов // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 8. С. 1617–1621. EDN: SWOHYJ.

Kulakov S. Yu., Bazarskiy O. V. Design procedure of concentration of polluting substances in atmosphere in the conditions of carrying over of the cloud from aviation engines of aircrafts. *Fundamental Research*. 2014;8:1617–1621. EDN: SWOHYJ. (In Russ.).

21. Maithya I., Kiema W. Green diplomacy in action: navigating international law for Kenya's sustainable aviation fuel transition. *Journal of Comparative Law in Africa*. 2025;12(12):140–169. <https://doi.org/10.47348/jcla/v12/i2a5>. EDN: GQYKVB.

22. Roginko S. A. The ICAO CORSIA system: A new carbon market for Russia. *Studies on Russian Economic Development*. 2025;6(36):903–911. <https://doi.org/10.1134/S1075700725700637>. EDN: NADTLF.

23. Мухаметжанова А. О. Экологичность гражданской авиации — тренд мирового авиапрома // *Авиационные системы*. 2021. № 1. С. 51–57. EDN: QYLLEI.

Mukhametdzhanova A. O. Environmental friendliness of civil aviation is a trend in the global aircraft industry. *Aviation Systems*. 2021;1:51–57. EDN: QYLLEI. (In Russ.).

24. Рагимов А. Т., Алиева М. Н. XVI Саммит БРИКС в Казани 22–24 октября 2024 года: основные итоги и перспективы развития // *Юридический вестник Дагестанского государственного университета*. 2024. Т. 52, № 4. С. 88–91. <https://doi.org/10.21779/2224-0241-2024-52-4-88-91>. EDN: LEDGLC.

Ragimov A. T. The XVI BRICS summit in Kazan on October 22–24, 2024 main results and development prospects. *Law Herald of Dagestan State University*. 2024;52(4):88–91. <https://doi.org/10.21779/2224-0241-2024-52-4-88-91>. EDN: LEDGLC. (In Russ.).

25. Conesa, Ju. A., Mortes J. The contribution of commercial flights to the global emissions of inorganic and organic pollutants. *Processes*. 2025;4(13):995. <https://doi.org/10.3390/pr13040995>. EDN: GFTBVG.

26. Kurawska-Pietrowicz P. Life cycle emission of selected sustainable aviation fuels: A review. *Transportation Research Procedia*. 2023;75:77–85. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.12.010>. EDN: HAZOFH.

27. Mayeres I., Proost S., Delhaye E. [et al.]. Climate ambitions for European aviation: Where can sustainable aviation fuels bring us? *Energy Policy*. 2023;175:113502. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113502>. EDN: PPBSEZ.

28. Garcia Franciscone B., Fernandes E. Entrepreneurship and future perspectives in BRICS-operational improvements and sustainable air transport development in the Global South. *Journal of BRICS Studies*. 2025;1(4):73–89. <https://doi.org/10.36615/3nk6gv18>. EDN: ROWYZW.

Вклад авторов:

А. В. Рыбьяков. Формулировка гипотезы о необходимости суверенной методологии углеродного регулирования в условиях санкционных ограничений,

анализ переориентации международных воздушных перевозок на рынки Глобального Юга, оценка правовых рисков участия российских авиакомпаний в CORSIA, общее редактирование текста, формулировка выводов.

О. Г. Феоктистова. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, разработка концепции национальной цифровой платформы MRV, определение технических требований к совместимости системы мониторинга, отчётности и верификации с международными стандартами ИКАО и требованиями партнёров по БРИКС и ШОС, обоснование интеграции алгоритмов машинного обучения для верификации данных о выбросах.

И. Н. Мерзликин. Развёрнутый обзор отечественных и зарубежных источников по проблематике CORSIA и углеродного регулирования в авиации, анализ существующих нормативных документов ИКАО и национального законодательства, выявление технических барьеров создания системы MRV в условиях ограничений на поставку авиационной техники, сравнение альтернативных механизмов углеродного учёта в рамках многостороннего и двустороннего сотрудничества.

Authors' contribution:

Artem V. Rybiakov. Formulation of the hypothesis on the need for a sovereign methodology of carbon regulation under sanctions restrictions, analysis of the reorientation of International air transportation to the markets of the Global South, assessment of legal risks of the Russian airlines participation in CORSIA, general editing of the text, formulation of conclusions.

Oksana G. Feoktistova. Formulation of the goal, objectives and the scientific problem, development of the concept of the national digital MRV platform, determination of technical requirements for the compatibility of the monitoring, reporting and verification system with ICAO International standards and the requirements of BRICS and SCO partners, justification of the integration of machine learning algorithms for emissions data verification.

Igor N. Merzlikin. Detailed reviewing of domestic and foreign sources on the problems of CORSIA and carbon regulation in aviation, analysis of existing ICAO regulatory documents and national legislation, identification of technical barriers to creating an MRV system under restrictions on the supply of aviation equipment, comparison of alternative carbon accounting mechanisms within multilateral and bilateral cooperation.

Информация об авторах:

РЫБЬЯКОВ Артем Викторович, аспирант кафедры «Безопасность полетов и жизнедеятельности» Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУ ГА), г. Москва; консультант Авиационного учебного центра «Хелиджет Тренинг (вертолетная и самолетная подготовка)», г. Москва.

SPIN-код: 7989-3130

AuthorID (РИНЦ): 1160497

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0851-1901>

e-mail: rybiakov@bk.ru

ФЕОКТИСТОВА Оксана Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

«Вычислительные машины, комплексы, системы и сети» МГТУ ГА, г. Москва.

SPIN-код: 5505-4010

AuthorID (РИНЦ): 461020

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6023-2140>

e-mail: o.feoktistova@mstuca.ru

МЕРЗЛИКИН Игорь Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Безопасность полетов и жизнедеятельности» МГТУ ГА, г. Москва.

SPIN-код: 1351-3522

AuthorID (РИНЦ): 729358

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1839-4282>

e-mail: i.merzlikin@mstuca.ru

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

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 26.01.2026; одобрена после рецензирования 23.07.2026; принята к публикации 30.07.2026.

Information about the authors:

RYBIAKOV Artem Viktorovich, Postgraduate of the Flight and Life Safety Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow; Consultant of the Helidjet Training Aviation Training Center (Helicopter and Aircraft training), Moscow.

SPIN-code: 7989-3130

AuthorID (RSCI): 1160497

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0851-1901>

e-mail: rybiakov@bk.ru

FEOKTISTOVA Oksana Gennadyevna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Computing Machinery, Complexes, Systems and Networks Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow.

SPIN-code: 5505-4010

AuthorID (RSCI): 461020

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6023-2140>

e-mail: o.feoktistova@mstuca.ru

MERZLIKIN Igor Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Flight and Life Safety Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow.

SPIN-code: 1351-3522

AuthorID (RSCI): 729358

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1839-4282>

e-mail: i.merzlikin@mstuca.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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 26.01.2026; approved after reviewing 23.07.2026; accepted for publication 30.07.2026.

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ВОКСЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ АППАРАТА R-ФУНКЦИЙ

А. Б. Яров 

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Россия, 127055, г. Москва, пер. Вадковский, 3а

 ab.yarov@yandex.ru

В статье рассматривается задача функционально-воксельного моделирования зоны обнаружения радиолокационной станции с учётом влияния рельефа местности. Описан принцип пересчёта локальных характеристик обновлённой функции, основанный на использовании локальных функций в виде V-представлений зоны обнаружения радиолокационной станции и местности. Пространство моделирования задаётся ограниченной областью и аппроксимируется регулярной дискретной сеткой.

Для объединения моделей используется аппарат R-функций Рвачёва, позволяющий реализовать теоретико-множественные операции пересечения и объединения в форме локальных функций. Это обеспечивает формирование результирующей модели в виде объединённого локального аналитического уравнения и корректный учёт экранирующих эффектов рельефа при построении зоны обнаружения.

Программная реализация демонстрирует работоспособность метода на тестовой сцене с дискретизацией на примере 200^3 вокселей. Предложенный подход может быть использован при анализе пространственных характеристик радиолокационного контроля и при разработке программных средств моделирования сложных геометрических сцен.

Ключевые слова: функционально-воксельный метод, M-образ, R-функции, однородный вектор, локальные геометрические характеристики, диаграмма направленности, моделирование радиолокационной станции

Для цитирования: Яров А. Б. Функционально-воксельное моделирование зоны обнаружения радиолокационной станции с учётом влияния рельефа местности на основе аппарата R-функций // Омский научный вестник. 2026. № 3 (199). С. 73–79. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-73-79>. EDN: ZQAWHW.



© Яров А. Б., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

FUNCTIONAL VOXEL MODELING OF THE RADAR DETECTION ZONE CONSIDERING THE TERRAIN INFLUENCE BY THE R-FUNCTION APPARATUS

А. Б. Яров 

Moscow State University of Technology "STANKIN",
Vadkovsky Ln., 3a, Moscow, 127055, Russia

 ab.yarov@yandex.ru

The article addresses the problem of functional-voxel modeling of a radar detection zone considering terrain effects. The author describes a principle for recalculating the local characteristics of the updated function by the use of local functions represented as V-representations of the radar detection zone and the terrain model. Moreover, the author defines the modeling space as a bounded domain and approximates by a regular discrete grid.

The article performs the integration of the models using the R-function apparatus developed by Rvachev, which enables the implementation of set-theoretic operations such as intersections and joins in terms of

local functions. This approach provides the construction of the resulting model in the form of a unified local analytical equation and ensures proper consideration of terrain-induced shielding effects in the formation of the detection zone.

The software implementation demonstrates the applicability of the method with the discretization of 200^3 voxels. The proposed approach can be applied to the analysis of spatial characteristics of radar coverage and to the development of software tools for modeling complex geometric stages.

Keywords: functional voxel method, M-image, R-functions, homogeneous vector, local geometric characteristics, radiation pattern, radar station modeling

For citation: Yarov A. B. Functional voxel modeling of the radar detection zone considering the terrain influence by the R-function apparatus. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):73–79. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-73-79>. EDN: ZQAWHW. (In Russ.).



© Yarov A. B., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Моделирование зон обнаружения радиолокационных станций (РЛС) невозможно без учёта рельефа поверхности. Земная поверхность влияет на формирование итоговой зоны обнаружения РЛС, что приводит к её искажению и уменьшению дальности обнаружения. Это особенно существенно при малых углах места, например, при обнаружении целей на малых высотах (50–500 м) [1–7].

В работе [8] описан порядок моделирования функционально-воксельной (ФВ) модели зоны обнаружения РЛС без учёта рельефа. В работе [9] описан принцип моделирования такой модели рельефа с учётом теневых зон. Для получения полноценной ФВ модели, которая учитывает все точки пространства, в которой она обнаруживает объекты, необходимо сопоставить существующий рельеф с моделируемой зоной РЛС.

Целью работы является описание принципов ФВ метода для разработки объединения модели зоны обнаружения РЛС с цифровой моделью рельефа, обеспечивающего учёт экранирующих эффектов и теневых областей.

Научная новизна работы заключается в объединении ФВ-модели зоны обнаружения и ФВ-модели рельефа в единую аналитическую форму, а также в применении R-конструкций пересечения и объединения, построенных на основе локальных уравнений разрабатываемых моделей.

Моделирование реализовано в виде программного комплекса на языке C++ с использованием WinAPI, выполняющего построение геометрической модели зоны обнаружения и её визуализацию в графической среде.

Подготовка используемых существующих моделей

Рассмотрим ФВ модель трёхмерного рельефа. Она представляет собой множество M-образов $\{M_i\}$, $i = 1 \dots 5$, отражающих локальные характеристики поверхности [10]. Пространство моделирования обозначается $\Omega \subset R^3$ и представляется дискретизацией на множество элементов $\{V_q\}$, $q = 1 \dots Q$, где q — воксель в соответствии с [11]. Каждый воксель V_q каждого M-образа необходимо понимать как значение локальной функции четырёхмерных атрибутов дискретного элемента пространства. Первые три атрибута — это положение (x, y, z) , а четвёртое является значением в виде цветовой кодировки. Для перехода от цветовой (V-представления)

к числовому описанию локальных характеристик (FV-представления) вводится оператор декодирования N [11], вычисляемый по формуле:

$$n_i = \frac{2M_i - P}{P},$$

где n_i — локальная геометрическая характеристика вокселя V_q i -го M-образа; M_i — цветное представление локальной характеристики V-представления модели вокселя V_q i -го M-образа; P — выбранная цветовая палитра; $P = 16777215$ цветов (глубина цвета — 24 бита).

Цветовое представление M_i определяется как взвешенная сумма трёхканальной модели цвета RGB-палитры. Значения каналов объединяются в одно 24-битное число рассматриваемого вокселя по формуле:

$$M_i = r + g \cdot 256 + b \cdot 65536,$$

где r, g, b — каналы (r — красный, g — зелёный, b — синий) — целые безразмерные числа в диапазоне от 0 до 255, означающие основные оттенки цветов RGB-палитры рассматриваемого вокселя.

Таким образом, для каждой точки функционально-воксельной модели получаем локальную функцию, которая представляется в виде:

$$L_1(x, y, z, u) = n_1^{(1)}x + n_2^{(1)}y + n_3^{(1)}z + n_4^{(1)}u + n_5^{(1)} = 0. \quad (1)$$

В аналогичном виде представляется модель зоны обнаружения РЛС, которая предварительно была описана аналитическими уравнениями по требуемой методике с учётом основного уравнения РЛС.

Значение максимальной дальности обнаружения антенны $r_{\max 0}$ в данной работе задаётся параметрически. В отличие от классического подхода, основанного на расчёте по прикладной форме основного уравнению РЛС (8), здесь он фиксируется численно с целью демонстрации работы алгоритма интеграции моделей:

$$r_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{2P_{\text{cp}} t_n G_m \sigma A_{\max}}{(4\pi)^2 \alpha_n q_0^2 k_{\text{ш}} k T}}, \quad (2)$$

где P_{cp} — средняя мощность излучения, Вт; t_n — время наблюдения отраженного сигнала, с; G_m — максимальное значение коэффициента усиления

передающей антенны; $A_{\max}$ — максимальное значение эффективной площади приемной антенны, м²; σ — значение эффективной площади рассеяния воздушной цели, м²; α_n — результирующий коэффициент потерь энергии при обработке сигналов и прохождении всех трактов радиолокационной системы, в размах; q_0^2 — значение отношения сигнал/шум, соответствующее заданному значению вероятности правильного обнаружения; $k_{\text{ш}}$ — коэффициент шума; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура окружающей среды, К.

Расчёт зоны обнаружения РЛС на пересечённой местности невозможен без учёта зон, экранированных рельефом. Для этого необходимо использовать модель рельефа, в которой задана точка установки РЛС r_0 ($r_0 \in \Omega$). От этой точки к каждой грани сцены строятся геометрические лучи для определения теневых зон. На основании этого строится обновлённая ФВ модель рельефа.

Координатные системы ФВ моделей рельефа и зоны обнаружения должны быть согласованы. Обе модели должны быть заданы в одной и той же декартовой системе координат с совпадающим началом отсчёта и ориентацией осей. В противном случае их области определения не пересекаются, что приводит к формированию пустой результирующей модели при выполнении операции R-пересечения.

Кроме того, требуется согласование масштабов и единиц измерения геометрических параметров. Если цифровая модель рельефа построена в километрах, то аналитическая модель зоны обнаружения также должна быть выражена в километрах. Несогласованность единиц измерения приводит к масштабному искажению локальных функций и, как следствие, к некорректному формированию результирующей ФВ модели.

Таким образом, для обновления ФВ модели зоны обнаружения РЛС необходима базовая модель этой зоны, а также ФВ модели рельефа, учитывающая экранирование для зоны обнаружения РЛС.

Расчёт построения цельной модели

Для расчёта результирующей модели используются ФВ представления двух моделей: итоговой модели зоны обнаружения РЛС и рельефа, учитывающего экранирование. Каждая из них задаётся аналитически в виде локальной функции, где индекс локальной геометрической характеристики показывает принадлежность к функции:

$$L_1(x, y, z, u) = n_1^{(1)}x + n_2^{(1)}y + n_3^{(1)}z + n_4^{(1)}u + n_5^{(1)} = 0;$$

$$L_2(x, y, z, u) = n_1^{(2)}x + n_2^{(2)}y + n_3^{(2)}z + n_4^{(2)}u + n_5^{(2)} = 0, \quad (3)$$

где x, y, z — декартовы координаты точки объекта в трёхмерном пространстве $\in \Omega$; u — значение величины в точке.

Так как локальная функция для любого объекта имеет одинаковую форму, то для удобства принимаем обозначение L_1 для зоны обнаружения, а L_2 — для рельефа.

Области используемых функций определяются следующими условиями:

$$u_{L1} = -\frac{n_1^{(1)}}{n_4^{(1)}}x - \frac{n_2^{(1)}}{n_4^{(1)}}y - \frac{n_3^{(1)}}{n_4^{(1)}}z - \frac{n_5^{(1)}}{n_4^{(1)}} \geq 0;$$

$$u_{L2} = -\frac{n_1^{(2)}}{n_4^{(2)}}x - \frac{n_2^{(2)}}{n_4^{(2)}}y - \frac{n_3^{(2)}}{n_4^{(2)}}z - \frac{n_5^{(2)}}{n_4^{(2)}} \geq 0, \quad (4)$$

где u_{L1}, u_{L2} — значения функции в точке в моделях L_1 и L_2 .

Результирующая модель зоны обнаружения РЛС формируется как теоретико-множественное пересечение этих моделей, которое достигается за счёт использования R-функциональных операций для локальной геометрии (R-функции) [12–15].

Операция пересечения задаётся следующей R-конструкцией:

$$L_3(x, y, z, u) = L_1(x, y, z, u) \wedge L_2(x, y, z, u) = u_{L1} + u_{L2} - \sqrt{u_{L1}^2 + u_{L2}^2}. \quad (5)$$

Докажем, что при $u_{L1} \geq 0, u_{L2} \geq 0$ и $u_{L1} \wedge u_{L2} = u_{L3} \geq 0$ использование R-пересечения для получения итоговой модели корректно. Для этого установим необходимость и достаточность указанных условий.

Пусть $u_{L3} \geq 0$, значит $u_{L1} + u_{L2} - \sqrt{u_{L1}^2 + u_{L2}^2} \geq 0 \Rightarrow u_{L1} + u_{L2} \geq \sqrt{u_{L1}^2 + u_{L2}^2} \geq 0$.

Обе части выражения принимают неотрицательные значения, поэтому допустимо возвести их в квадрат, сохранив знак неравенства. Получим $(u_{L1} + u_{L2})^2 \geq u_{L1}^2 + u_{L2}^2$.

Раскрывая скобки в неравенстве, получаем $u_{L1}^2 + 2u_{L1}u_{L2} + u_{L2}^2 \geq u_{L1}^2 + u_{L2}^2$. Сокращая одинаковые слагаемые, приходим к формуле $2u_{L1}u_{L2} \geq 0$, откуда следует $u_{L1}, u_{L2} \geq 0$. Последнее означает, что величины u_{L1}, u_{L2} имеют одинаковый знак или равны нулю. С учётом условия $u_{L1} + u_{L2} \geq 0$ значения u_{L1} и u_{L2} больше или равны нулю.

Пусть $u_{L1} \geq 0$ и $u_{L2} \geq 0$, тогда $(u_{L1} + u_{L2})^2 = u_{L1}^2 + 2u_{L1}u_{L2} + u_{L2}^2 \geq u_{L1}^2 + u_{L2}^2$. Извлекая квадратный корень из обеих частей неравенства, получаем формулу $u_{L1} + u_{L2} \geq \sqrt{u_{L1}^2 + u_{L2}^2}$. Следовательно, $u_{L1} + u_{L2} - \sqrt{u_{L1}^2 + u_{L2}^2} \geq 0$, что и требовалось доказать.

Для удобства вычислений локальная функция результирующей модели $L_3(x, y, z, u)$ может быть найдена путём раздельного определения результирующих коэффициентов.

Формулы для вычисления локальных геометрических характеристик результирующей модели [11]:

$$n_1^{(3)} = \frac{n_1^{(1)}}{n_4^{(1)}} + \frac{n_1^{(2)}}{n_4^{(2)}} - \left(\frac{\frac{n_1^{(1)}}{n_4^{(1)}}u^{(1)} + \frac{n_1^{(2)}}{n_4^{(2)}}u^{(2)}}{\sqrt{u^{(1)2} + u^{(2)2}}} \right);$$

$$n_2^{(3)} = \frac{n_2^{(1)}}{n_4^{(1)}} + \frac{n_2^{(2)}}{n_4^{(2)}} - \left(\frac{\frac{n_2^{(1)}}{n_4^{(1)}}u^{(1)} + \frac{n_2^{(2)}}{n_4^{(2)}}u^{(2)}}{\sqrt{u^{(1)2} + u^{(2)2}}} \right);$$

$$n_3^{(3)} = \frac{n_3^{(1)}}{n_4^{(1)}} + \frac{n_3^{(2)}}{n_4^{(2)}} - \left(\frac{\frac{n_3^{(1)}}{n_4^{(1)}}u^{(1)} + \frac{n_3^{(2)}}{n_4^{(2)}}u^{(2)}}{\sqrt{u^{(1)2} + u^{(2)2}}} \right);$$

$$n_4^{(3)} = 1;$$

$$n_5^{(3)} = \frac{n_5^{(1)}}{n_4^{(1)}} + \frac{n_5^{(2)}}{n_4^{(2)}} - \left(\frac{\frac{n_5^{(1)}}{n_4^{(1)}}u^{(1)} + \frac{n_5^{(2)}}{n_4^{(2)}}u^{(2)}}{\sqrt{u^{(1)2} + u^{(2)2}}} \right). \quad (6)$$

Подставив локальные геометрические характеристики для точки, мы получим локальную функ-

цию пересечения двух ФВ моделей. Она имеет тот же привычный вид, но уже с другими характеристиками каждой рассматриваемой точки:

$$L_3(x, y, z, u) = n_1^{(3)}x + n_2^{(3)}y + n_3^{(3)}z + n_4^{(3)}u + n_5^{(3)} = 0. \quad (7)$$

Существуют задачи, в которых необходима модель рельефа и зоны обнаружения как единая модель. Например, когда необходимо определить точки в пространстве с пустыми зонами, где объект не задевает местность и не попадает в зону РЛС, используется аналогичный подход. В данном случае используются полученные локальные уравнения для рассматриваемых точек в сцене и применяется теоретико-множественная операция объединения. При этом используется функция L_2 первоначально рельефа.

$$L_4(x, y, z, u) = L_3(x, y, z, u) \cup L_2(x, y, z, u) = u_{L_3} + u_{L_2} + \sqrt{u_{L_3}^2 + u_{L_2}^2}, \quad (8)$$

где $L_4(x, y, z, u)$ — локальная функция объединенных моделей.

Визуализация построения

Для демонстрации результатов приведены V-представления двух исходных моделей. Область моделирования аппроксимируется регулярной дискретной сеткой 200^3 вокселей.

Все модели заданы в единой декартовой системе координат. Область пространства определяется как ограниченная область $\Omega \subset R^3$, где $\Omega = \{(x, y, z) \in R^3: -307 \leq x \leq 307; -307 \leq y \leq 307; 49 \leq z \leq 253\}$.

В качестве точки размещения РЛС выбрана точка $A \in \Omega$ с координатами (99, -56, 131). Положение точки выбрано таким образом, чтобы обеспечить наглядную демонстрацию влияния рельефа на формирование теневых зон.

Поскольку трёхмерная модель состоит из 200 дискретных слоёв по координате z , для иллюстрации выбран один характерный слой. Для этого слоя формируются пять М-образов, отражающих локальные геометрические характеристики модели на рис. 1.

Используя М-образы существующих моделей и выполнив пересчёт локальных характеристик, получаем обновлённую модель на рис. 2.

После выполнения расчётов (6) получаем обновлённую модель функции L_3 (7) на рис. 3.

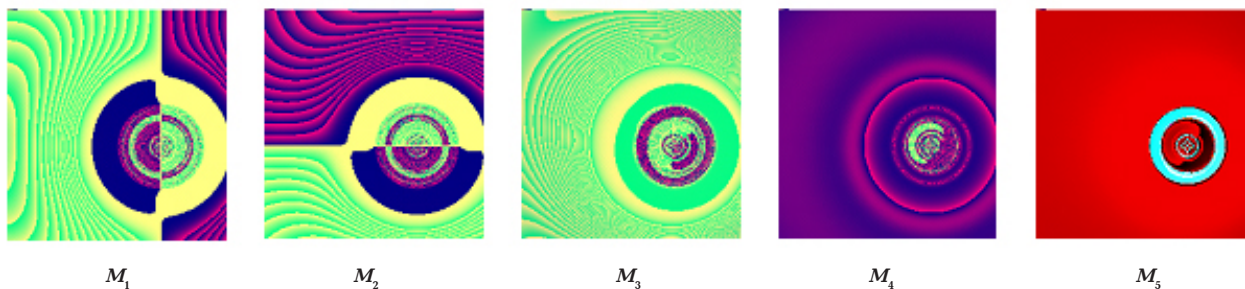


Рис. 1. V-представление модели L_1 зоны обнаружения (пять М-образов для 83-го слоя из 200, $z = 133.66$)
Fig. 1. V-representation of the L_1 detection zone model (five M-images for the 83rd layer out of 200, $z = 133.66$)
Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

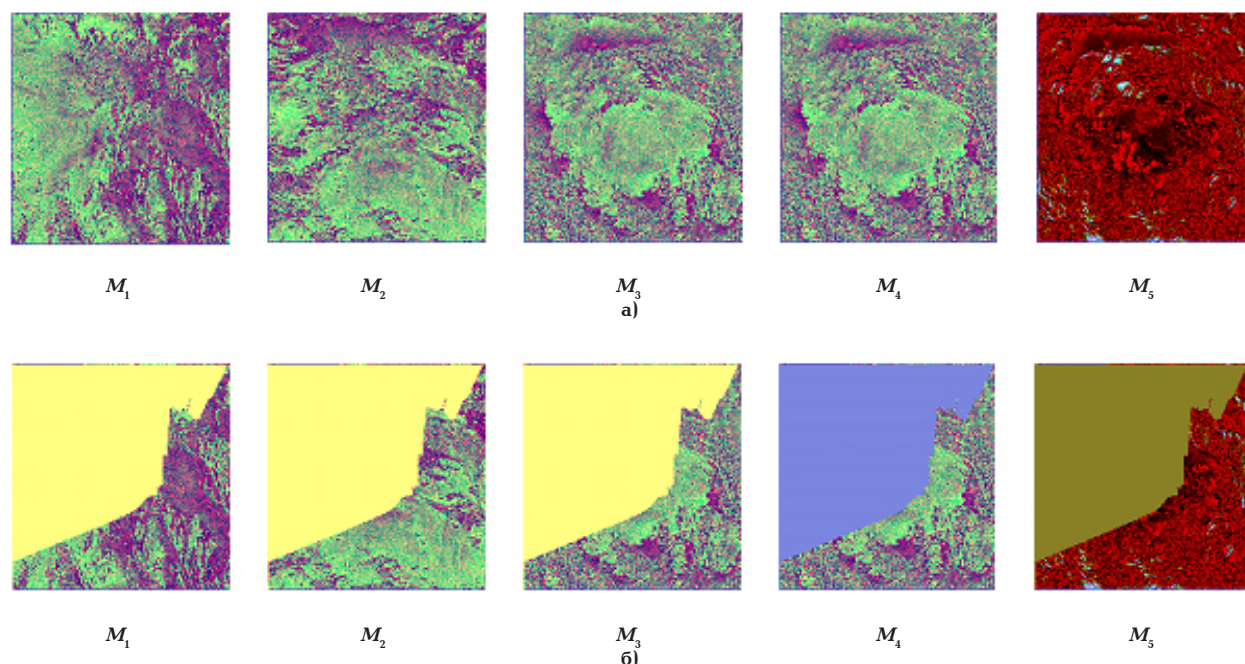


Рис. 2. V-представление модели L_2 : а) первоначального рельефа;
б) с применённым алгоритмом (пять М-образов для 83-го слоя из 200, $z = 133.66$)
Fig. 2. V-representation of the L_2 model: а) initial terrain;
б) with the applied algorithm (five M-images for the 83rd layer out of 200, $z = 133.66$)
Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

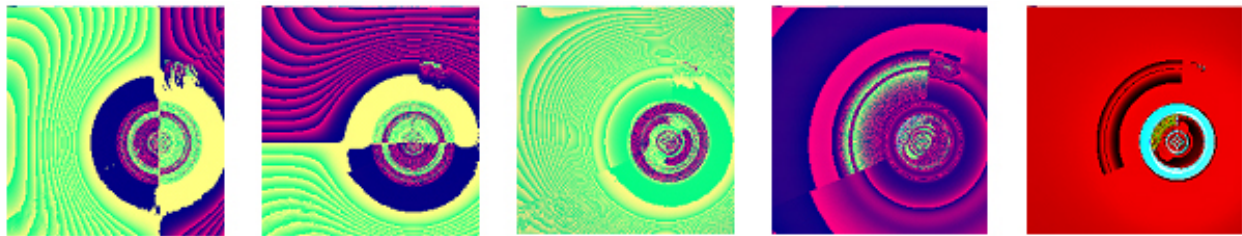


Рис. 3. V-представление модели L_3 зоны обнаружения РЛС (пять М-образов для 83-го слоя из 200, $z = 133,66$)
Fig. 3. V-representation of the L_3 radar detection zone model (five M-images for the 83rd layer out of 200, $z = 133,66$)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

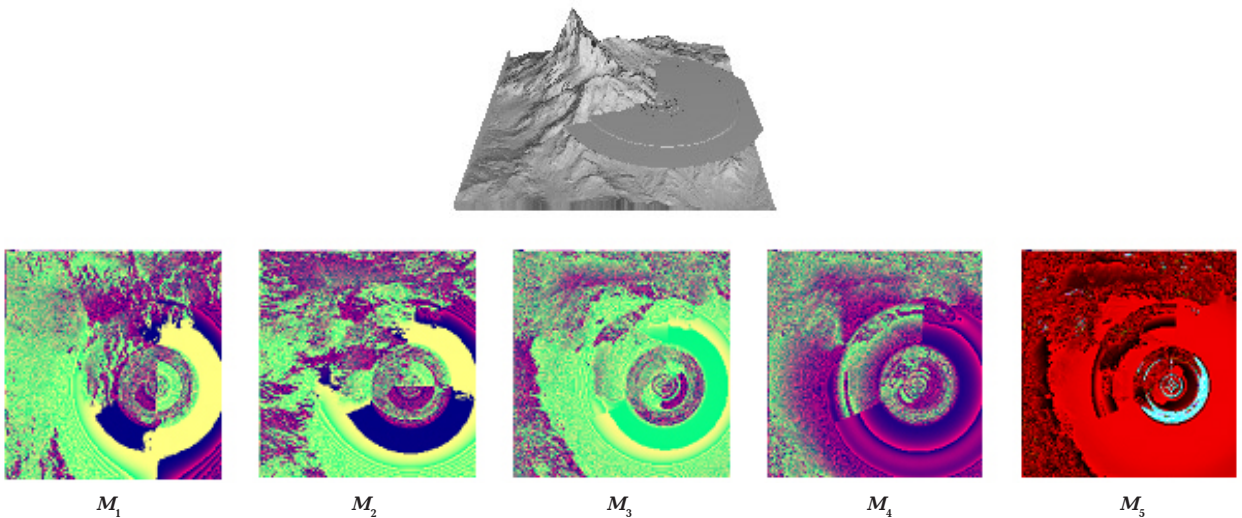


Рис. 4. V-представление объединённой модели L_4 рельефа с применённым алгоритмом (пять М-образов для слоя) с 3D-визуализацией

Fig. 4. V-representation of the integrated L_4 terrain model with the applied algorithm (five M-images for the selected layer) with 3D visualization

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Заключительная модель для этой статьи представляет собой объединённую модель первоначального рельефа и полученную модель объединённой зоны РЛС L_4 на рис. 4.

Результаты

Построенные модели являются V-представлениями совмещённых моделей зоны обнаружения РЛС совместно с используемым рельефом. Они состоят из пересчитанных элементов М-образов, сгенерированных для каждого слоя сцены с помощью ФВ подхода.

Полное время рендеринга всех М-образов модели зоны обнаружения РЛС с учётом экранирования рельефом составило 2 мин 36 с. Время построения модели, объединяющей рельеф и скорректированную зону обнаружения, оказалось идентичным. Следовательно, вычислительная сложность при моделировании ФВ методом не зависит от сложности рельефа или зоны обнаружения.

Компьютерное моделирование модели зоны обнаружения РЛС с учётом рельефа местности выполнено на вычислительной машине со следующими параметрами: процессор 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12400F 2.50 GHz; 32 ГБ оперативной памяти; операционная система Microsoft Windows 10 Pro, версия 22H2, сборка ОС 19045.6332.

Обсуждения

Для построения полученной модели использовался алгоритм из статьи [9] с применением метода

Supersampling (SSAA). Это позволило учесть влияние алиасинга при затенении. В результате модель получилась твердотельной, без ошибочных точек в зоне обнаружения, что повышает точность моделирования. Однако использование технологии GDI WinApi в настоящее время является устаревшим и подходит только для академических исследований. Для прикладных задач компьютерного моделирования следует применять современные кроссплатформенные фреймворки и библиотеки, такие как Qt с модулем QImage для попиксельного доступа, а также Direct2D.

Построенная ФВ модель зоны РЛС и рельефа пригодна для решения задач проектирования доступных пространств, в частности — для поиска оптимального пути воздушных объектов с учётом рельефа и зон обнаружения. Так как данная модель состоит из точек, описываемых локальными уравнениями, это даёт возможность использовать её в дальнейших аналитических расчётах.

Заключение

В работе реализован подход к геометрическому моделированию зоны обнаружения радиолокационной станции с учётом экранирующего влияния рельефа на основе ФВ метода. Показано, что использование локальных аналитических функций в сочетании с аппаратом R-функций позволяет корректно выполнять теоретико-множественные операции пересечения и объединения моделей без потери аналитической целостности описания.

Предложенная схема интеграции ФВ модели зоны обнаружения и цифровой модели рельефа обеспечивает формирование единого локального уравнения результирующей сцены, которое учитывает теневые области и геометрические ограничения, обусловленные поверхностью местности. Это подтверждает применимость метода для задач пространственного анализа радиолокационного покрытия.

Программная реализация продемонстрировала устойчивость вычислительного процесса при дискретизации пространства размерностью 200i точек.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности применения разработанного подхода при проектировании систем радиолокационного контроля, анализе доступных пространств, а также при решении задач оптимизации маршрутов движения объектов с учётом зон обнаружения и особенностей рельефа.

В качестве дальнейшего направления исследований целесообразно рассматривать оптимизацию вычислительных процедур построения ФВ моделей, включая распараллеливание трассировки лучей и применение специализированных структур данных для ускорения рендеринга и аналитической обработки трёхмерных сцен, чтобы на практике использовать предложенный метод в моделях с большим количеством точек.

Список источников / References

1. Абраменков В. В., Алферьев А. В., Андриухин М. В. [и др.]. Радиолокация. Теория и практика: монография / под ред. А. В. Бляхмана. Москва: ЮНИТИ, 2023. 711 с. ISBN 978-5-238-03712-7.

Abramennkov V. V., Alferyev A. V., Andryukhin M. V. [et al.]. Radiolokatsiya. Radar. Theory and practice / Ed. by A. V. Blyakhman. Moscow, 2023. 711 p. ISBN 978-5-238-03712-7. (In Russ.).

2. Куприяшкин И. Ф., Лихачев В. П., Рязанцев Л. Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением: монография. Москва: Радиотехника, 2020. 279 с. ISBN 978-5-93108-191-5.

Kupryashkin I. F., Likhachyov V. P., Ryazantsev L. B. Malogabaritnyye mnogofunktsionalnyye RLS s nepreryvnyy chototno-modulirovannym izlucheniym. Moscow, 2020. 279 p. ISBN 978-5-93108-191-5. (In Russ.).

3. Лавров А. А., Антонов И. К. Многолучевые радиолокаторы. Борьба с дронами: монография. Москва: Радиотехника, 2021. 249 с. ISBN 978-5-93108-209-7. EDN: YPUWJF.

Lavrov A. A., Antonov I. K. Mnogoluchevyye radiolokatory. Bor'ba s dronami. Moscow, 2021. 249 p. ISBN 978-5-93108-209-7. EDN: YPUWJF. (In Russ.).

4. Васюков В. Н., Лозовский И. Ф., Морозов Ю. В. [и др.]. Пространственно-временная обработка широкополосных сигналов в радиолокационных системах с адаптивными цифровыми антенными решетками: монография. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2022. 239 с. ISBN 978-5-7782-4743-7. EDN: MLXGRJ.

Vasyukov V. N., Lozovskiy I. F., Morozov Yu. V. [et al.]. Space-time processing of wideband signals in radar systems with adaptive digital antenna arrays. Novosibirsk, 2022. 239 p. ISBN 978-5-7782-4743-7. EDN: MLXGRJ. (In Russ.).

5. Гарин Е. Н., Ратушняк В. Н., Гладышев А. Б., Смирнов Д. И. Программное и аппаратное моделирование радиолокационных сигналов РЛС вертикального зондирования // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 13, № 3. С. 370–378. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0229> EDN: PHQEYU.

Garin E. N., Ratushnyak V. N., Gladyshev A. B., Smirnov D. I. Software and hardware simulation of radar system signals of the vertical sounding. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2020;13(3):370–378. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0229> EDN: PHQEYU. (In Russ.).

6. Владимирова В. М., Дмитриев Д. Д., Ратушняк В. Н., Колупаев А. Ю. Экспериментальные исследования макета радиолокационной станции вертикального зондирования // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 15, № 7. С. 874–884. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0442> EDN: ZFMJGV.

Vladimirova V. M., Dmitriyev D. D., Ratushnyak V. N., Kolupayev A. Yu. Experimental investigations of the vertical sounding radar layout. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2022;15(7):874–884. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0442> EDN: ZFMJGV. (In Russ.).

7. Белый Ю. И. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения: монография. Москва: Радиотехника, 2018. 456 с. ISBN 978-5-93108-183-0. <https://doi.org/10.18127/B9785931081830>. EDN: URXSMJ.

Belyy Yu. I. Radiolokatsionnyye sistemy spetsialnogo i grazhdanskogo naznacheniya. Moscow, 2018. 456 p. ISBN 978-5-93108-183-0. <https://doi.org/10.18127/B9785931081830>. EDN: URXSMJ. (In Russ.).

8. Толоч А. В., Яров А. Б., Панкова А. Е., Ченцов А. Е. Функционально-воксельный метод для геометрического описания зоны обнаружения радиолокационной станции // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 43–50. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2025-196-43-50>. EDN: BIQLJD.

Tolok A. V., Yarov A. B., Pankova A. E., Chenstov A. E. Functional-voxel method for geometric description of radar station detection zone. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025;196(4):43–50. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2025-196-43-50>. EDN: BIQLJD. (In Russ.).

9. Яров А. Б., Толоч А. В. Визуализация затенения объемного поля методом лучевого сканирования на основе метода функционально-воксельного моделирования // Программирование. 2026. № 2. С. 76–83. <https://doi.org/10.7868/S3034584726010058>. EDN: HMITQF.

Yarov A. B., Tolok A. V. Development of a volumetric field shading visualization algorithm using ray scanning based on the functional-voxel modeling method. *Programming and Computer Software*. 2026;2:76–83. <https://doi.org/10.7868/S3034584726010058>. EDN: HMITQF. (In Russ.).

10. Толоч А. В. Графические образы-модели в информационных технологиях // Прикладная информатика. 2009. № 4. С. 31–40. EDN: KWMTBP.

Tolok A. V. Graphic image-models in information technologies. *Journal of Applied Informatics*. 2009;4:31–40. EDN: KWMTBP. (In Russ.).

11. Толоч А. В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании: монография / под ред. С. Н. Васильева. Москва: Физматлит, 2016. 112 с. ISBN 978-5-9221-1680-0. EDN: WIGUOJ.

Tolok A. V. Funktsional'no-voksel'nyy metod v komp'yuternom modelirovanii / Ed. by S. N. Vasilyeva. Moscow, 2016. 112 p. ISBN 978-5-9221-1680-0. EDN: WIGUOJ. (In Russ.).

12. Толоч А. В., Толоч Н. В. Principles of organization of continuity in discrete geometrized space. *Scientific Visualization*. 2025;17:10–18. <https://doi.org/10.26583/sv.17.5.02>.

13. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения: монография. Киев: Наукова думка, 1982. 552 с.

Rvachev V. L. Teoriya R-funktsiy i nekotoryye yeye prilozheniya. Kiev, 1982. 552 p. (In Russ.).

14. Максименко-Шейко К. В., Мацевитый А. М., Толоч А. В., Шейко Т. И. R-функции и обратная задача аналитической геометрии в трехмерном пространстве // Информационные технологии. 2007. № 10. С. 23–32. EDN: IJQBMN.

Maksimenko-Sheyko K. V., Matsevityi A. M., Tolok A. V., Sheyko T. I. R-functions and inverse problem of analytic

geometry in three-dimensional space. *Information Technologies*. 2007;10:23–32. EDN: IJQBMN. (In Russ.).

15. Литвинова Ю. С., Максименко-Шейко К. В., Шейко Т. И. Математическое и компьютерное моделирование строительных конструкций на основе R-функций // Проблемы машиностроения. 2014. Т. 17, № 3. С. 12–18.

Litvinova Yu. S., Maksimenko-Sheyko K. V., Sheyko T. I. Mathematical and computer modeling of building structures based on R-functions. *Problems of Mechanical Engineering*. 2014;17(3):12–18. (In Russ.).

Информация об авторе:

ЯРОВ Алексей Борисович, аспирант кафедры «Инженерная графика» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», г. Москва.

e-mail: ab.yarov@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.

При подготовке данной рукописи автор не использовал генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 11.02.2026; одобрена после рецензирования 02.06.2026; принята к публикации 08.07.2026.

YAROV Aleksey Borisovich, Postgraduate of the Engineering Graphics Department, Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow.
e-mail: ab.yarov@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 author did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 11.02.2026; approved after reviewing 02.06.2026; accepted for publication 08.07.2026.



УДК/UDC 621.311

DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-80-87>

EDN: UBWTLM

Научная статья/Original article

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И СХЕМЫ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ОБЪЕКТА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА С АНОМАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ

И. Н. Паскарь, А. С. Устюжанина✉, В. В. Артемасов

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

✉ au.ustyuzhanina@mail.ru

В статье рассмотрена задача обоснования предварительной мощности и схемы присоединения объекта распределенной генерации для населенного пункта, характеризующегося повышенным удельным электропотреблением относительно нормируемого уровня. Работа развивает ранее выполненный этап интервального оценивания техноценоза муниципальных образований Прокопьевского района Кемеровской области — Кузбасса и посвящена следующему этапу оптимизации: выбору аномального объекта, нормированию его удельного электропотребления и предварительной инженерной оценке мощности локального генерирующего источника.

В качестве объекта исследования выбран поселок Маяковка на территории Кемеровской области — Кузбасса. На основе непрерывного ряда из 48 месячных интервалов наблюдения выполнено сопоставление фактического и нормируемого удельного электропотребления, определена средняя величина превышения фактических значений над нормируемыми и показано, что эквивалентная средняя мощность компенсирующего источника составляет порядка 28 кВт, тогда как для более устойчивой компенсации дополнительной потребности в энергоресурсе целесообразно рассматривать предпроектный диапазон установленной мощности 32–70 кВт. В исследовании обоснована схема совместной работы локального источника с централизованной сетью, при которой внешняя сеть используется как основной резерв.

Полученные результаты могут быть использованы при предварительном выборе параметров распределенной генерации для других сельских населенных пунктов с аномальным электропотреблением.

Ключевые слова: техноценоз, интервальное оценивание, нормирование электропотребления, распределенная генерация, локальная система электроснабжения, схема присоединения

Для цитирования: Паскарь И. Н., Устюжанина А. С., Артемасов В. В. Обоснование предварительной мощности и схемы присоединения объекта распределенной генерации для населенного пункта с аномальным электропотреблением. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 80–87. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-80-87>. EDN: UBWTLM.



© Паскарь И. Н., Устюжанина А. С., Артемасов В. В., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

JUSTIFICATION OF PRELIMINARY SIZING AND INTERCONNECTION SCHEME FOR A DISTRIBUTED GENERATION UNIT SERVING AN AREA WITH ABNORMAL POWER DEMAND

I. N. Paskar, A. S. Ustyuzhanina✉, V. V. Artemasov

T. F. Gorbachev State Technical University,
Vesennaya St., 28, Kemerovo, 650000, Russia

✉ au.ustyuzhanina@mail.ru

The article examines the problem of the justification of preliminary sizing and interconnection scheme for a distributed generation unit serving an area with abnormal power demand relative to the normative level. The research extends the previously completed stage of interval estimation of the technocenosis of municipal entities within the Prokopyevsky district of the Kemerovo Region (Kuzbass). The paper is dedicated to the subsequent optimization phase: the identification of the anomalous object, the normalization of its specific electricity consumption, and a preliminary engineering assessment of the local generating unit's capacity.

The object of the research is the Mayakovka village in the Kemerovo Region (Kuzbass). The authors perform the comparison of actual versus normalized specific electricity consumption basing on a continuous dataset spanning 48 months. The average magnitude by which actual values exceed the normative baseline is determined. It is shown that the equivalent average power of a compensating source amounts to approximately 28 kW; however, for more stable compensation of the additional energy demand, it is advisable to consider a preliminary design range for the installed capacity of 32–70 kW. The research substantiates an operating scheme for the local generation unit in parallel with the centralized grid, wherein the external network serves as the primary reserve.

The results can be applied in the preliminary selection of distributed generation parameters for other rural areas with abnormal electricity consumption.

Keywords: technocenosis, interval estimation, rationing of electricity consumption, distributed generation, local power supply system, connection scheme

For citation: Paskar I. N., Ustyuzhanina A. S., Artemasov V. V. Justification of preliminary sizing and interconnection scheme for a distributed generation unit serving an area with abnormal power demand. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):80–87. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-80-87>. EDN: UBWTLM. (In Russ.).



© Paskar I. N., Ustyuzhanina A. S., Artemasov V. V., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Развитие распределенной генерации остается одним из ключевых направлений повышения устойчивости и гибкости распределительных сетей. Для российской энергетики эта проблематика дополнительно актуализируется требованиями законодательства об электроэнергетике^{1,2}, правилами технологического присоединения³ и развитием механизмов микрогенерации⁴. Современные зару-

бежные исследования также показывают, что эффективность объектов распределенной генерации определяется не только самим фактом их внедрения, но и корректностью выбора места установки, мощности, режимов работы в сети и характера взаимодействия с накопителями энергии [1–6]. В более поздних исследованиях дополнительно рассматривается влияние распределенных энергоресурсов на загрузку распределительных сетей, учет

¹ Об электроэнергетике: Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

² Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года: Распоряжение Правительства РФ от 12.04.2025 № 908-р. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

³ Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства к электрическим сетям: Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 № 861. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

⁴ О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации: Постановление Правительства РФ от 02.03.2021 № 299. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

неопределенности при выборе параметров микросетей, а также размещение систем накопления энергии [7–10].

Проблема выбора параметров распределенной генерации в локальных системах электроснабжения включает как минимум три взаимосвязанные задачи: определение целесообразности размещения источника, оценку требуемой установленной мощности и выбор режима его взаимодействия с существующей сетью. На практике именно сочетание этих трех задач определяет, будет ли локальный источник выполнять компенсирующую, резервную или частично автономизирующую функцию. Следовательно, для территориально распределенных и малонаселенных объектов важно не только фиксировать факт повышенного электропотребления, но и переходить к количественной оценке параметров возможного источника распределенной генерации.

Для сельских населенных пунктов и удаленных нагрузочных узлов задача приобретает дополнительное значение, поскольку локальный источник может рассматриваться одновременно как средство частичной компенсации повышенной нагрузки и инструмент повышения надежности, так и в качестве механизма снижения зависимости от внешней сети в переходных режимах. Тип источника, характер нагрузки и способ его включения определяют различие между эквивалентной средней мощностью и требуемой установленной мощностью реального генерирующего объекта, поэтому в предпроектных исследованиях необходимо не ограничиваться усредненным расчетом, а рассматривать диапазон мощности, отражающий вариативность нагрузки по интервалам наблюдения.

С этой точки зрения техноценнологический подход представляет интерес как инструмент предварительной структурной диагностики энергосистемы. Его сильная сторона заключается не в детальном режимном моделировании, а в возможности на основе рангового анализа и нормирования выделить объекты, для которых отклонение параметров электропотребления носит устойчивый, а не случайный характер, что делает техноценнологический подход удобным именно для первого этапа отбора объектов, потенциально требующих дополнительного инженерного анализа и уточнения параметров распределенной генерации.

В рамках техноценнологического подхода крупные инфраструктурные и территориально распределенные энергетические системы могут быть описаны как техноценозы, для которых характерны устойчивые закономерности структуры и расхода ресурсов [11]. В прикладных энергетических задачах это позволяет использовать процедуры рангового анализа, мониторинга, параметрической адаптации и режимного нормирования электропотребления [12–15].

Ранее авторами были опубликованы результаты интервального оценивания техноценоза муниципальных образований Прокопьевского района Кузбасса, в рамках которого были выделены населенные пункты с аномально высоким уровнем удельного электропотребления [16]. Дальнейшее развитие этой линии представлено в работах по применению ципфового метода прогнозирования и исследованию региональных энергосистем с использованием техноценнологического подхода [17, 18]. В отличие от ранее опубликованного этапа интервального оценивания в настоящей работе вы-

полняется переход к предварительной инженерной оценке мощности локального источника распределенной генерации и выбору схемы его совместной работы с сетью для конкретного населенного пункта.

Цель исследования

Цель статьи состоит в переходе от этапа выявления аномального объекта к этапу предварительного инженерного обоснования параметров распределенной генерации. Для достижения цели решаются следующие задачи: уточнить перечень приоритетных объектов; выполнить нормирование удельного электропотребления для выбранного населенного пункта; оценить эквивалентную среднюю мощность локального генерирующего источника; определить предпроектный диапазон его мощности; предложить схему присоединения к существующей системе электроснабжения.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в том, что техноценнологический подход используется не только для выявления населенного пункта с аномальным удельным электропотреблением, но и для перехода к следующему этапу оптимизации — предварительной инженерной оценке не только эквивалентной средней мощности локального источника распределенной генерации, но и диапазона его мощности в зависимости от распределения отклонений по непрерывному ряду наблюдений, а также выбору схемы совместной работы такого источника с централизованной сетью.

Материалы и методы

В качестве исходной методической базы использованы положения техноценнологического подхода и процедуры рангового анализа, изложенные в трудах Б. И. Кудрина, В. И. Гнатюка и О. Р. Кивчуна [11–15]. В работе последовательно применяются интервальное оценивание, режимное нормирование и инженерная интерпретация полученных результатов (рис. 1).

На первом этапе используется ранее сформированный массив данных по муниципальным образованиям Прокопьевского района, включающий сведения об удельном электропотреблении и численности населения [16]. По результатам интервального оценивания были выделены населенные пункты, наиболее существенно отклоняющиеся от доверительного интервала по параметру электропотребления. Ранжированное представление объектов с наибольшим отклонением приведено на рис. 2. Среди выявленных объектов в качестве расчетного примера выбран поселок Маяковка, имеющий высокое относительное отклонение и достаточную повторяемость аномальных значений в динамике [16].

На втором этапе выполняется нормирование удельного электропотребления поселка Маяковка по 48 последовательным месячным интервалам наблюдения. Для каждого интервала фиксируются фактическое удельное электропотребление, нормируемое значение и величина отклонения. В исходном массиве удельные показатели представлены в тыс. кВт·ч на человека за месяц, что обеспечивает сопоставимость рядов и позволяет перейти от удельного отклонения к оценке требуемого дополнительного энергоресурса.

Использование непрерывного ряда из 48 месячных интервалов наблюдения позволяет решить две

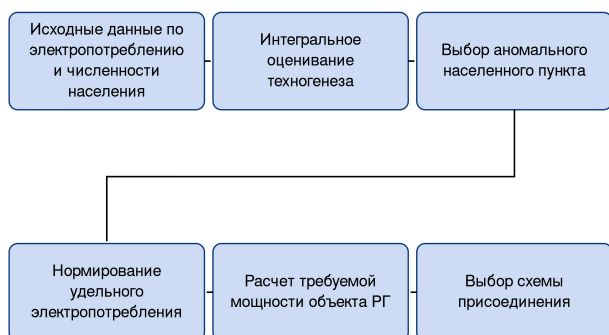


Рис. 1. Последовательность перехода от интервального оценивания к выбору параметров распределенной генерации

Fig. 1. Transition sequence from interval estimation to distributed generation parameter selection

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

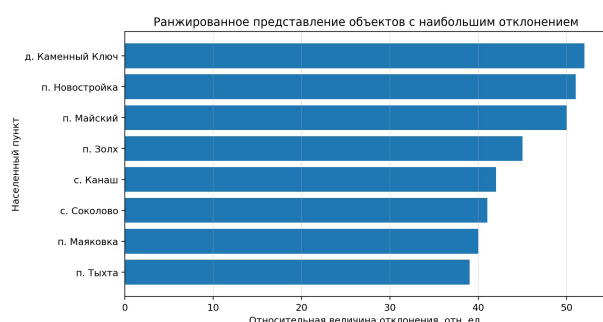


Рис. 2. Ранжированное представление населенных пунктов с наибольшим отклонением от доверительного интервала

Fig. 2. Ranked representation of areas with the largest deviation from the confidence interval

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

задачи. Во-первых, такой ряд достаточно протяжен для выявления устойчивых закономерностей отклонения фактического удельного электропотребления от нормируемого уровня. Во-вторых, его длина обеспечивает возможность перехода от единичных пиковых значений к статистически более устойчивым характеристикам, включая среднее значение, медиану и перцентильные оценки. В рамках данного исследования это принципиально важно, поскольку цель исследования состоит не в фиксации одиночного экстремума, а в определении инженерно осмысленного диапазона мощности локального источника распределенной генерации.

Нормируемое значение удельного электропотребления в данной постановке рассматривается как расчетный ориентир, с которым сопоставляется фактическое значение в каждом интервале наблюдения. Положительное отклонение интерпретируется как добавочная потребность в энергоресурсе, которая потенциально может быть компенсирована локальным источником. При этом среднее отклонение характеризует усредненный уровень такой потребности, тогда как распределение отклонений по интервалам дает возможность оценить, насколько часто и насколько существенно система выходит за пределы типового режима.

Переход от среднего отклонения к эквивалентной средней мощности носит в настоящей работе

предпроектный характер. Он позволяет связать месячную энергетическую добавку с условной мощностью источника, способного компенсировать эту добавку в пределах расчетного интервала. Вместе с тем такая величина не должна отождествляться с окончательной установленной мощностью конкретного генерирующего оборудования, поскольку последняя зависит от типа источника, коэффициента использования установленной мощности, принятой схемы работы с сетью и степени требуемой компенсации отклонений.

Таким образом, в работе наряду со средней эквивалентной мощностью дополнительно рассматриваются медианная и перцентильные оценки. Такой подход позволяет перейти от одного усредненного значения к диапазону мощности, более пригодному для предварительного инженерного выбора. Нижняя граница диапазона отражает компенсацию среднего и типового уровня дополнительной потребности, тогда как верхняя связана с необходимостью покрытия более напряженных интервалов нагрузки.

Расчет требуемой мощности объекта распределенной генерации выполняется через переход от среднемесячного дефицита электроэнергии к эквивалентной мощности источника:

$$\Delta \bar{W} = \bar{\delta} \cdot N; \quad (1)$$

$$P_{\text{РГ}} = \frac{1000 \cdot \Delta \bar{W}}{T_{\text{эф}}}, \quad (2)$$

где $\bar{\delta}$ — среднее отклонение фактического удельного электропотребления от нормируемого, тыс. кВт·ч/(чел.·мес); N — численность населения рассматриваемого поселка, чел.; $\Delta \bar{W}$ — среднемесячный дополнительный энергоресурс, тыс. кВт·ч/мес; $T_{\text{эф}}$ — расчетная продолжительность покрытия дополнительной потребности в пределах месячного интервала, ч.; $P_{\text{РГ}}$ — эквивалентная средняя мощность объекта распределенной генерации, кВт.

Величина $P_{\text{РГ}}$, определяемая по среднему значению отклонения, рассматривается в работе как эквивалентная средняя мощность компенсирующего источника, тогда как для предпроектного выбора дополнительно анализируется распределение мощности по всем интервалам наблюдения. Такая постановка позволяет перейти от удельного месячного дефицита электроэнергии к предварительной инженерной оценке мощности локального источника. Вместе с тем для предпроектного выбора необходимо учитывать не только среднее значение отклонения, но и его распределение по интервалам наблюдения. Поэтому дополнительно выполняется пересчет эквивалентной мощности по каждому из 48 интервалов наблюдения, что позволяет оценить не только средний уровень дополнительной потребности в энергоресурсе, но и диапазон мощности, необходимый для компенсации более напряженных интервалов.

В расчетах приняты следующие параметры: $N = 238$ чел. по данным исходного массива наблюдений для поселка Маяковска; $T_{\text{эф}} = 744$ ч/мес. как расчетная продолжительность покрытия дополнительной потребности в пределах месячного интервала для эквивалентного непрерывно доступного источника.

Тогда среднемесячный дополнительный энергоресурс составляет:

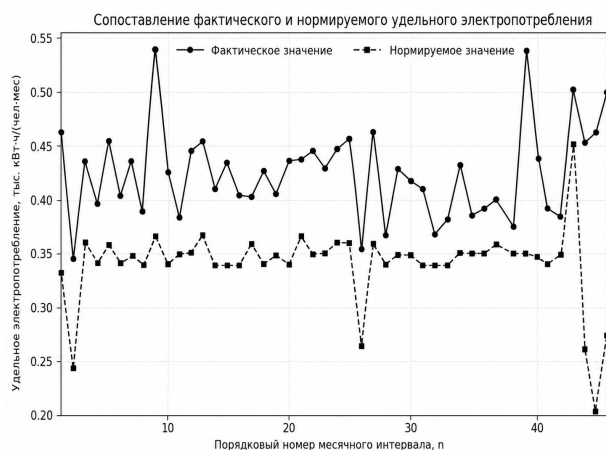


Рис. 3. Сопоставление фактического и нормируемого удельного электропотребления по последовательным интервалам наблюдения

Fig. 3. Comparison of actual and normalized specific electricity consumption over consecutive observation intervals

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors



Рис. 4. Динамика отклонения фактического электропотребления от нормируемого значения
Fig. 4. Dynamics of the deviation of actual electricity consumption from the normative value

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

$$\Delta \bar{W} = 0,087 \cdot 238 = 20,706 \text{ тыс. кВт·ч/мес.}, \quad (3)$$

а эквивалентная средняя мощность:

$$P_{\text{рт}} = \frac{1000 \cdot 20,706}{744} = 27,8 \text{ кВт}, \quad (4)$$

то есть ориентировочно 28 кВт.

Результаты и обсуждение

Результаты нормирования удельного электропотребления для поселка Маяковка представлены на рис. 3, 4. Графическое представление полного ряда из 48 интервалов наблюдения позволяет проследить как общий уровень электропотребления, так и интервалы наиболее выраженных отклонений без перегрузки статьи громоздкими таблицами первичных данных.

Среднее фактическое удельное электропотребление за рассматриваемый ряд наблюдения составило 0,416 тыс. кВт·ч/(чел·мес.), среднее нормируемое значение — 0,330 тыс. кВт·ч/(чел·мес.), а среднее отклонение — 0,087 тыс. кВт·ч/(чел·мес.), что эквивалентно 87 кВт·ч/(чел·мес.). Положительное отклонение наблюдается во всех 48 интервалах,

а максимумы достигают 0,24 тыс. кВт·ч/(чел·мес.) в завершающей части ряда. Это указывает на устойчивый, а не случайный характер превышений и подтверждает целесообразность рассмотрения локального источника распределенной генерации как средства частичной компенсации дополнительной потребности в энергоресурсе.

При принятых значениях $N = 238$ чел. и $T_{\text{эф}} = 744$ ч/мес. эквивалентная средняя мощность компенсирующего источника составляет 27,8 кВт, что в инженерной записи округляется до 28 кВт. Однако пересчет мощности по каждому из 48 интервалов наблюдения показывает, что медианное значение составляет 25,6 кВт, уровень 75-го перцентиля — 32,0 кВт, уровень 90-го перцентиля — 60,8 кВт, уровень 95-го перцентиля — 70,2 кВт, а максимальное значение достигает 76,8 кВт. Следовательно, величина 27,8 кВт характеризует средний уровень дополнительной потребности в энергоресурсе, тогда как для покрытия более напряженных интервалов наблюдения целесообразно рассматривать более высокий диапазон установленной мощности.

Полученные значения позволяют по-разному интерпретировать искомую мощность локального источника. Если задача формулируется как компенсация среднего уровня дополнительной потребности в энергоресурсе на протяжении всего ряда наблюдения, то ориентиром служит величина порядка 28 кВт. В этом случае источник рассматривается как компенсирующий в усредненном смысле, а его мощность отражает эквивалентную среднюю потребность объекта. Такой результат полезен для предварительной энергетической оценки, однако сам по себе он не гарантирует достаточность мощности в интервалах, где отклонение существенно превышает средний уровень.

Если же постановка задачи смещается в сторону более устойчивого покрытия отклонений, то для предпроектного выбора более показательными становятся перцентильные оценки. Значение порядка 32 кВт соответствует уровню, близкому к верхней границе типового режима, и может рассматриваться как минимально практичный ориентир для локального источника, рассчитанного на компенсацию не только среднего, но и значительной части повышенных отклонений. Значения уровня 60–70 кВт, в свою очередь, характеризуют уже более напряженные режимы и отражают сценарий, при котором источник должен компенсировать большую часть интервалов с повышенной дополнительной потребностью в энергоресурсе.

С инженерной точки зрения это означает, что выбор мощности должен определяться не только средним отклонением, но и требуемой функцией объекта распределенной генерации в системе электроснабжения. Если источник рассматривается прежде всего как средство сглаживания типового избытка потребления и снижения нагрузки на внешнюю сеть, то допустим нижний диапазон. Если же от него требуется более глубокая компенсация в напряженных режимах, то проектный ориентир должен быть смещен в сторону верхних значений диапазона. Именно поэтому в настоящей работе предлагается рассматривать не фиксированное окончательное значение мощности, а предпроектный диапазон 32–70 кВт.

С учетом характера сезонной неравномерности нагрузки и того обстоятельства, что поселок Маяковка не является полностью изолированным от централизованной сети, наиболее рациональным

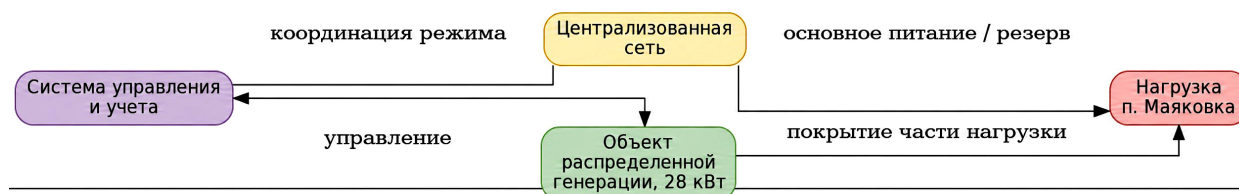


Рис. 5. Рекомендуемая схема совместной работы локального источника распределенной генерации и централизованной сети для п. Маяковка
 Fig. 5. Recommended scheme for the joint operation of a local distributed generation source and a centralized network for the Mayakovka village
 Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

представляется схема совместной работы локального объекта распределенной генерации с внешней сетью (рис. 5). В этом случае распределенная генерация покрывает часть текущей нагрузки, а внешняя сеть используется как основной резерв и как источник балансирования режима. Такой подход лучше согласуется с современными представлениями о внедрении объектов распределенной генерации в распределительных сетях [1–10]. При этом нижняя граница диапазона мощности может быть ориентирована на покрытие среднего и типового уровня дополнительной потребности, тогда как верхняя граница должна рассматриваться для вариантов, в которых требуется более глубокая компенсация отклонений без перехода к полной автономизации объекта.

Предлагаемое решение не предполагает полной автономизации поселка и не требует обязательного использования дизель-генератора в качестве постоянного резерва. Приоритет отдается схеме, в которой локальный источник уменьшает объем потребления из внешней сети в базовых и переходных режимах, а внешняя сеть сохраняет функцию резервирования. Для последующего проектного этапа требуется уточнение типа источника, коэффициента использования установленной мощности, режима взаимодействия с потребителем и параметров учета выработки.

Ограничения исследования

Полученная оценка мощности и предлагаемая схема присоединения имеют характер предварительного инженерного обоснования. В работе не рассматривались технико-экономическая оптимизация источника, выбор конкретной технологии генерации, моделирование режимов напряжения и потокораспределения в сети, а также вариант с накопителем энергии. Предложенная оценка получена без учёта потерь в электрических сетях и без моделирования режимов напряжения, что снижает точность предварительного обоснования; уточнение этих факторов относится к последующей стадии проектной детализации. Принятое значение $T_{эф} = 744$ ч/мес. соответствует эквивалентному непрерывно доступному источнику и не является прямым проектным режимом конкретной технологии генерации. Следовательно, эквивалентная средняя мощность порядка 28 кВт и предпроектный диапазон 32–70 кВт должны рассматриваться как результаты предварительного инженерного этапа, требующие дальнейшего уточнения на стадии проектной детализации с учетом типа источника, режима его работы, экономических ограничений и характеристик сети.

Заключение

Проведенное исследование позволило последовательно перейти от выявления населенного пункта с аномальным электропотреблением к предварительному инженерному обоснованию параметров локального объекта распределенной генерации.

Показано, что техноценнологический подход позволяет использовать результаты интервального оценивания не только для выявления аномальных объектов, но и для перехода к прикладной задаче выбора параметров распределенной генерации.

Для поселка Маяковка на основе нормирования по непрерывному ряду из 48 интервалов наблюдения установлено устойчивое превышение фактических значений над нормируемыми; среднее отклонение составляет 0,087 тыс. кВт·ч/(чел.·мес.), или 87 кВт·ч/(чел.·мес.).

Предварительный инженерный расчет показывает, что эквивалентная средняя мощность компенсирующего источника составляет 27,8 кВт, то есть порядка 28 кВт. Вместе с тем анализ распределения отклонений по интервалам наблюдения показывает, что для более устойчивой компенсации в напряженных режимах целесообразно рассматривать предпроектный диапазон установленной мощности 32–70 кВт. Полученный диапазон 32–70 кВт соответствует типовому классу маломощных объектов распределенной генерации и может быть реализован на различной технологической базе — например, газопоршневыми или дизельными установками, а также возобновляемыми источниками энергии в сочетании с накопителем. Выбор конкретной технологии в пределах указанного диапазона выходит за рамки настоящего предварительного этапа и определяется на стадии проектной детализации с учетом удаленности объекта от централизованной сети, требуемого режима работы (постоянная или резервная генерация) и технико-экономических ограничений.

Для рассматриваемого поселка предпочтительна схема совместной работы локального источника с централизованной сетью, при которой внешняя сеть выполняет резервную функцию, а распределенная генерация покрывает часть текущей нагрузки. Такая схема согласуется как с предпроектным диапазоном мощности 32–70 кВт, так и с трактовкой 28 кВт как эквивалентной средней мощности компенсирующего источника.

Практическая ценность работы состоит в возможности тиражирования предложенной последовательности действий на другие сельские населенные пункты с аномальным электропотреблением при условии последующей верификации расчетных параметров по фактическим режимным и демографическим данным.

1. Grisales-Noreña L. F., Restrepo-Cuestas B. J., Cortés-Cañedo B. [et al.]. Optimal location and sizing of distributed generators and energy storage systems in microgrids: A review. *Energies*. 2023;16(1):106. <https://doi.org/10.3390/en16010106>. EDN: COASYU.
2. Nogueira W. C., Garcés Negrete L. P., López-Lezama J. M. Optimal allocation and sizing of distributed generation using interval power flow. *Sustainability*. 2023;15(6):5171. <https://doi.org/10.3390/su15065171>. EDN: GAMPBB.
3. Jain A., Gupta S. C. Optimal placement of distributed generation in power distribution system and evaluating the losses and voltage using machine learning algorithms. *Frontiers in Energy Research*. 2024;12:1378242. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1378242>. EDN: COYMJZ.
4. Hussein Farh H. M., Al-Shamma'a A. A., Qamar A. [et al.]. Optimal sizing and placement of distributed generation under n-1 contingency using hybrid crow search – particle swarm algorithm. *Sustainability*. 2024;16(6):2380. <https://doi.org/10.3390/su16062380>. EDN: SGQFNY.
5. Bouchikhi N., Boussadia F., Bouddou R. [et al.]. Optimal distributed generation placement and sizing using modified grey wolf optimization and ETAP for power system performance enhancement and protection adaptation. *Scientific Reports*. 2025;15:13919. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98012-0>. EDN: FCMNED.
6. Khenissi I., Guesmi T., Alshammari B. M. [et al.]. A hybrid chaotic bat algorithm for optimal placement and sizing of DG units in radial distribution networks. *Energy Reports*. 2024;12:1723 – 1741. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.07.042>. EDN: JZBTFQ.
7. Iqbal H., Stevenson A., Sarwat A. I. Impact analysis and optimal placement of distributed energy resources in diverse distribution systems for grid congestion mitigation and performance enhancement. *Electronics*. 2025;14(10):1998. <https://doi.org/10.3390/electronics14101998>. EDN: CJTLJN.
8. Valencia-Díaz A., Hincapié R. A., Gallego R. A. Optimal placement and sizing of distributed generation in electrical dc distribution networks using a stochastic mixed-integer LP model. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2025;50:5835 – 5851. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09655-6>. EDN: TNPXSA.
9. Castellanos-Buitrago S. F., Maya-Duque P., Villa-Acevedo W. M. [et al.]. Enhancing energy microgrid sizing: a multiyear optimization approach with uncertainty considerations for optimal design. *Algorithms*. 2025;18(2):111. <https://doi.org/10.3390/a18020111>. EDN: OTOAZ.
10. Karve G. M., Thakare M. S., Vaidya G. A. Optimal siting and sizing of battery energy storage system in distribution system in view of resource uncertainty. *Energies*. 2025;18(9):2340. <https://doi.org/10.3390/en18092340>. EDN: BLWSUW.
11. Кудрин Б. И. Выделение и описание электрических ценозов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 1985. № 7. С. 49 – 54.
12. Kudrin B. I. Vydeleniye i opisaniye elektricheskikh tsenozov. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika*. 1985;7:49 – 54. (In Russ.).
13. Гнатюк В. И., Кивчун О. Р., Васильев В. Н., Луценко Д. В. Методика мониторинга электропотребления электротехнического комплекса Калининградской области // Промышленная энергетика. 2015. № 3. С. 26 – 35. EDN: TNGDEJ.
14. Gnatyuk V. I., Kivchun O. R., Vasil'yev V. N., Lutsenko D. V. Metodika monitoringa elektropotrebleniya elektrotekhnicheskogo kompleksa Kaliningradskoy oblasti. *Industrial Energy*. 2015;3:26 – 35. EDN: TNGDEJ. (In Russ.).
15. Гнатюк В. И., Кивчун О. Р., Илюшин П. В. Параметрическая адаптация данных об электропотреблении объектов региональной энергосистемы на основе рангового анализа // Промышленная энергетика. 2020. № 10. С. 48 – 56. EDN: HJXNGB.
16. Gnatyuk V. I., Kivchun O. R., Ilyushin P. V. Parametricheskaya adaptatsiya dannykh ob elektropotreblenii ob"yektov regional'noy energosistemy na osnove rangovogo analiza. *Industrial Energy*. 2020;10:48 – 56. EDN: HJXNGB. (In Russ.).
17. Кивчун О. Р., Гнатюк В. И. Методика определения Z2-потенциала энергосбережения объектов регионально-го электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4-4(54). С. 94 – 98. <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.003>. EDN: XWFKBD.
18. Kivchun O. R., Gnatyuk V. I. Methodology for determining the Z2-energy saving potential objects of the regional electrotechnical complex. *Marine Intellectual Technologies*. 2021;4-4(54):94 – 98. <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.54.4.003>. EDN: XWFKBD. (In Russ.).
19. Кивчун О. Р. Режимное нормирование электропотребления объектов регионального электротехнического комплекса на основе векторного рангового анализа // Промышленная энергетика. 2023. № 4. С. 48 – 58. EDN: ZSVDBK.
20. Kivchun O. R. Regime rationing of the power consumption of objects of the regional electrotechnical complex on the basis of vector rank analysis. *Industrial Energy*. 2023;4:48 – 58. EDN: ZSVDBK. (In Russ.).
21. Паскарь И. Н., Фролова М. В. Интервальное оценивание техноценоза по параметру потребления электроэнергии на примере Прокопьевского района Кузбасса // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 5 (151). С. 64 – 70. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2020-5-64-70>. EDN: DEREMW.
22. Paskar I. N., Frolova M. V. Interval assessment of technocenosis by the electric power consumption parameter on the example of Prokopyevsky district of Kuzbass. *Mining Machines and Automatics*. 2020;5(151):64 – 70. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2020-5-64-70>. EDN: DEREMW. (In Russ.).
23. Завьялов Н. В., Паскарь И. Н., Лебедев Г. М. Применение цифрового (Z-) метода прогнозирования при нормировании техноценоза региональной энергосистемы // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 5 (169). С. 22 – 30. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2023-5-22-30>. EDN: GNOBDZ.
24. Zavyalov N. V., Paskar I. N., Lebedev G. M. Application of the digital (Z-) forecasting method when normalizing the technocenosis of the regional power system. *Mining Machines and Automatics*. 2023;5(169):22 – 30. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2023-5-22-30>. EDN: GNOBDZ. (In Russ.).
25. Завьялов Н. В., Паскарь И. Н., Лебедев Г. М. Исследование региональных энергетических систем с применением техноценологического подхода // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2 (172). С. 39 – 50. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2024-2-39-50>. EDN: LMPBXG.
26. Zavyalov N. V., Paskar I. N., Lebedev G. M. Study of regional energy systems using the technocentric approach. *Mining Machines and Automatics*. 2024;2(172):39 – 50. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2024-2-39-50>. EDN: LMPBXG. (In Russ.).

Вклад авторов:

И. Н. Паскарь. Концепция и постановка задачи исследования; разработка методики перехода от нормирования электропотребления к предварительной оценке мощности распределенной генерации; интерпретация результатов; подготовка и научное редактирование текста; формулирование выводов.

А. С. Устюжанина. Сбор и обработка исходных данных; выполнение расчетов; определение статистических характеристик и диапазона мощности; подготовка графиков и блок-схем; участие в подготовке первоначального текста статьи.

В. В. Артемасов. Анализ отечественных и зарубежных исследований; проверка методики и расчетных результатов; интерпретация схемы совместной ра-

боты источника с централизованной сетью; научное редактирование рукописи.

Authors' contribution:

Ivan N. Paskar. Conceptualization and formulation of the research problem; development of a methodology for transitioning from electricity consumption normalization to the preliminary capacity assessment of distributed generation; interpretation of results; manuscript preparation and scientific editing; formulation of conclusions.

Anastasia S. Ustyuzhanina. Collection and processing of initial data; performance of calculations; determination of statistical characteristics and power range; preparation of graphs and flowcharts; contribution to the drafting of the initial manuscript.

Valery V. Artemasov. Analysis of domestic and international studies; verification of the methodology and computational results; interpretation of the scheme for joint operation of the source with the centralized grid; scientific editing of the manuscript.

Информация об авторах:

ПАСКАРЬ Иван Николаевич, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение горных и промышленных предприятий» Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева (КузГТУ), г. Кемерово.

SPIN-код: 2129-7337

AuthorID (РИНЦ): 786435

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4826-4967>

AuthorID (SCOPUS): 57202332941

ResearcherID: R-6973-2016

e-mail: pin.egpp@kuzstu.ru

УСТЮЖАНИНА Анастасия Сергеевна, магистрант кафедры «Электроснабжение горных и промышленных предприятий» КузГТУ, г. Кемерово.

SPIN-код: 7603-5037

AuthorID (РИНЦ): 1335364

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2049-5984>

e-mail: au.ustyuzhanina@mail.ru

АРТЕМАСОВ Валерий Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение горных и промышленных предприятий» КузГТУ, г. Кемерово.

SPIN-код: 4707-5196

AuthorID (РИНЦ): 262472

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8548-0098>

e-mail: memorial142@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в пред-

ставленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 22.04.2026; одобрена после рецензирования 18.06.2026; принята к публикации 08.07.2026.

Information about the authors:

PASKAR Ivan Nikolayevich, Senior Lecturer of the Power Supply of Mining and Industrial Enterprises Department, T. F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo.

SPIN-code: 2129-7337

AuthorID (RSCI): 786435

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4826-4967>

AuthorID (SCOPUS): 57202332941

ResearcherID: R-6973-2016

e-mail: pin.egpp@kuzstu.ru

USTYUZHANINA Anastasia Sergeevna, Master's Student of the Power Supply of Mining and Industrial Enterprises Department, T. F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo.

SPIN-code: 7603-5037

AuthorID (RSCI): 1335364

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2049-5984>

e-mail: au.ustyuzhanina@mail.ru

ARTEMASOV Valery Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Power Supply of Mining and Industrial Enterprises Department, T. F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo.

SPIN-code: 4707-5196

AuthorID (RSCI): 262472

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8548-0098>

e-mail: memorial142@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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 22.04.2026; approved after reviewing 18.06.2026; accepted for publication 08.07.2026.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ

М. Ю. Николаев , А. А. Татевосян

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

 mulp@yandex.ru

Использование магнитно-импульсного устройства преобразования электрической энергии в полезную механическую высокоскоростную работу имеет большие перспективы в применении в промышленности. Обладая высоким быстродействием (1–5 мс) и низким потреблением (не более 500 Вт · ч), такие установки позволяют за счет электромагнитной силы взаимного отталкивания якоря и индуктора достигать высокого экономического эффекта. При этом процесс возникновения вихревых токов в якоре, который и является основополагающим процессом, изучен слабо.

Целью данного исследования является изучение процессов возникновения магнитных полей и вихревых токов в якоре, измерение их напряженностей, что в итоге приводит к возникновению силы обратного воздействия на порождающее их электромагнитное поле индуктора. Благодаря методам моделирования импульсного электромагнитного взаимодействия, рассмотренным в данной статье, представляется возможным в дальнейшем регулировать на натурных образцах импульс тока определенной амплитуды, который и создает токи Фуко в якоре. Это и создает предпосылки для нарушения адгезионных связей между слоями очищаемого материала и поверхности в пределах зоны упругой деформации, что является наиболее актуальным способом применения магнитно-импульсного устройства в промышленности.

Таким образом, в основе математического аппарата моделирования физических процессов в программном комплексе ELCUT 6.0 лежит метод узловых потенциалов для магнитных и электрических полей. Применение данного метода позволяет с достаточной степенью точности описывать распределение магнитного поля и плотности вихревых токов в якоре на всех этапах импульсного воздействия. Полученные результаты моделирования создают основу для дальнейшей оптимизации конструкции магнитно-импульсного устройства и обоснованного выбора параметров импульса тока, обеспечивающих максимальную эффективность нарушения адгезионных связей при минимальных энергозатратах.

Ключевые слова: электроимпульсные системы, магнитное поле, вектор магнитной индукции, электромагнитное взаимодействие, моделирование электромагнитных полей, токи Фуко, импульсное электромагнитное поле

Для цитирования: Николаев М. Ю., Татевосян А. А. Моделирование электромагнитных полей взаимодействия в электроимпульсных системах. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 88–96. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-88-96>. EDN: ZOIEEP.



© Николаев М. Ю., Татевосян А. А., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODELING OF ELECTROMAGNETIC INTERACTION FIELDS IN PULSED POWER SYSTEMS

M. Yu. Nikolaev✉, A. A. Tatevosyan

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

✉ mulp@yandex.ru

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК № 3 (199) 2026
OMSK SCIENTIFIC BULLETIN NO. 3 (199) 2026

The use of a magnetic pulse device for converting electrical energy into useful mechanical high-speed operation has great prospects for industrial applications. With high speed (1–5 ms) and low consumption (no more than 500 Wh) such installations allow achieving a high economic effect due to the electromagnetic force of mutual repulsion of the armature and the inductor. At the same time, the process of eddy currents in the armature, which is the fundamental process, has been poorly studied.

The aim of the research is to study the processes of magnetic field and eddy current generation in the armature, measure their intensities, which ultimately leads to the emergence of a back-action force on the inducer's electromagnetic field that generated them. Thanks to the methods for modeling pulsed electromagnetic interaction considered in this article, it allows further regulating on full-scale samples a current pulse of certain amplitude, which creates Foucault currents (eddy currents) in the armature. It creates prerequisites for disrupting the adhesive bonds between the layers of the material being cleaned and the surface within the limits of elastic deformation zone, which constitutes the most relevant industrial application of a magnetic-pulse device.

Thus, the mathematical framework for modeling physical processes in the ELCUT 6.0 Professional Software Package is based on the method of nodal potentials for magnetic and electric fields. The use of this method allows describing the distribution of the magnetic field and eddy current density in the armature with sufficient accuracy at all stages of pulsed action. The obtained simulation results provide a basis for further optimization of the design of the magnetic-pulse device and the well-reasoned selection of current pulse parameters that ensure maximum efficiency in disrupting adhesive bonds with minimal energy consumption.

Keywords: electric pulse systems, magnetic field, magnetic induction vector, electromagnetic interaction, modeling of electromagnetic fields, Foucault currents, pulsed electromagnetic field

For citation: Nikolaev M. Yu., Tatevosyan A. A. Modeling of electromagnetic interaction fields in pulsed power systems. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):88–96. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-88-96>. EDN: ZOIEEP. (In Russ.).



© Nikolaev M. Yu., Tatevosyan A. A., 2026.

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

Введение

Актуальность работы обусловлена необходимостью углубленного анализа механического взаимодействия в паре «индуктор—якорь», ключевым результатом которого является высокоскоростная импульсная деформация на соприкасающихся с якорем поверхностях.

Цель исследования — определение оптимальных конструктивно-технологических параметров системы (геометрии, материала, индуктивности индуктора и якоря) на основе комплексного анализа взаимодействия их электромагнитных полей. В свою очередь анализ направлен на максимизацию отталкивающей электродинамической силы путем математического моделирования физических процессов в программном комплексе ELCUT 6.0 (Professional).

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются электроимпульсные системы различных геометрических размеров, конфигураций, обладающие различными электромагнитными характеристиками, а также зарядные и емкостные системы. Основным изучаемый процесс — импульсное силовое взаимодействие между индуктором и проводящим якорем, возника-

ющее вследствие динамического отклика вихревых токов на разрядный ток катушки [1–6].

До настоящего времени процессы наведения вихревых токов в результате воздействия нарастающего или убывающего (изменяющегося) электромагнитного поля, вызванного разрядом конденсатора на индуктивность катушки индуктора, изучены достаточно слабо и тем не менее применяются в различных областях электротехники. Непосредственно сам проводящий материал (различные виды металлов) со своей ярко выраженной кристаллической основой образует замкнутые контуры, в которых по закону электромагнитной индукции и протекают эти самые вихревые токи (токи Фуко), образующие свои единичные электромагнитные поля, препятствующие нарастанию или убыванию порождающего их электромагнитного поля индуктора. Результатом указанного взаимодействия является упругая деформация целевой поверхности (например, в процессе очистки). Эффект высокоскоростной упругой деформации поверхностей, на которые направлено взаимодействие, не приводит к разрушению их кристаллических решеток, но способствует разрушению адгезии поверхности и веществ, подлежащих очистке. Работа си-



Рис. 1. Силовые элементы электроимпульсной системы взаимодействия:
а) индуктор; б) высоковольтный конденсатор

Fig. 1. Power elements of the electric pulse interaction system:
a) inductor; б) high-voltage capacitor

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

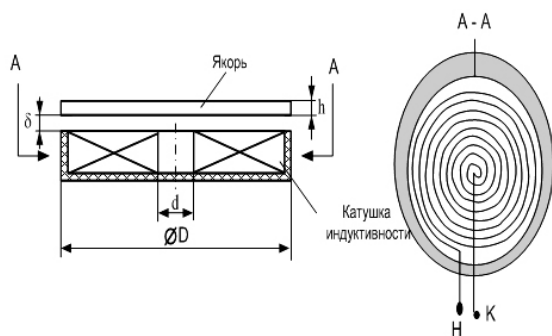


Рис. 2. Исполнительное устройство электроимпульсной системы

Fig. 2. Actuator of the electric pulse system

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

системы реализует принцип концентрации энергии во времени. Длительная фаза накопления энергии в ёмкостном накопителе (порядка 10^3 с) сменяется её сверхбыстрым (10^{-4} – 10^{-6} с) преобразованием в импульс механического воздействия, что обеспечивает усиление мощности до 10^6 и более, моделируя эффект импульсного ударного воздействия.

Действительно, процесс наведения токов Фуко в якоре, согласно результату моделирования и натурным экспериментом на экспериментальной установке очистки от наледи, происходит практически мгновенно, не позволяя механическому напряжению превысить пороговое значение начала процесса текучести (вида деформации кристаллической решетки). Таким образом, можно предположить, что разрушение адгезионного слоя между поверхностью материала, на который воздействует механически якорь, и очищаемым материалом вызвано волновыми процессами, которые были образованы вследствие механического воздействия якоря на поверхность воздействия. Следует отметить, что это только предположение и подтверждающих его исследований не проводилось.

Методом исследования выступило компьютерное моделирование нестационарного электромагнитного процесса в связке с электрической цепью, проведенное в среде ELCUT 6.0 (профессиональная

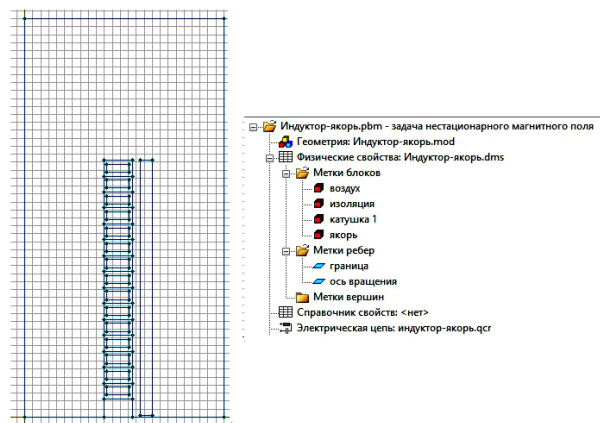


Рис. 3. Формирование и расчет магнитной системы взаимодействия индуктора и якоря

Fig. 3. Formation and calculation of the magnetic interaction system of the inductor and the armature

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

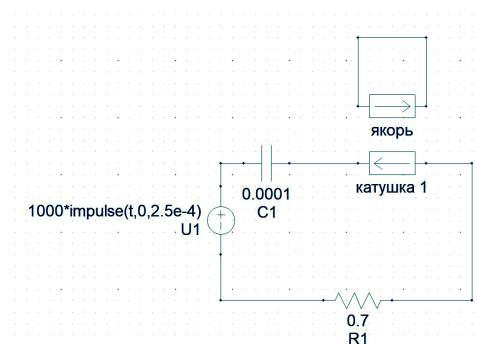


Рис. 4. Электрическая схема взаимодействия индуктора (катушка) и якоря с параметрами элементов

Fig. 4. Electrical circuit of the interaction of the inductor (coil) and the armature with the elements parameters

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

версия). Данный программно-аналитический комплекс, основанный на методе конечных элементов узлов электромагнитных полей, подходит для решения такого типа аналитических задач, позволяет наглядно с помощью цветовой шкалы определить направление векторов силовых линий и значения напряженностей исследуемых полей. Кроме того, программа позволяет точно воспроизводить параметры экспериментальных физических установок, а также все параметры среды взаимодействия в системе «индуктор—якорь» при построении и функционировании электрической цепи. При этом все параметры и характеристики электрической цепи схемы замещения отражаются на системе взаимодействия «индуктор—якорь» с высокой метрологической точностью. Далее была построена модель системы взаимодействия «индуктор—якорь» с использованием реальных параметров физической модели опытного образца генератора. Силовые элементы электроимпульсной системы взаимодействия показаны на рис. 1.

Эскизная модель исследуемой магнитной системы «индуктор—якорь» представлена на рис. 2. Основные этапы моделирования процесса взаимодействия между плоским индуктором и пластиной якоря, выполненные в среде ELCUT 6.0, иллюстрируются на рис. 3 и 4.

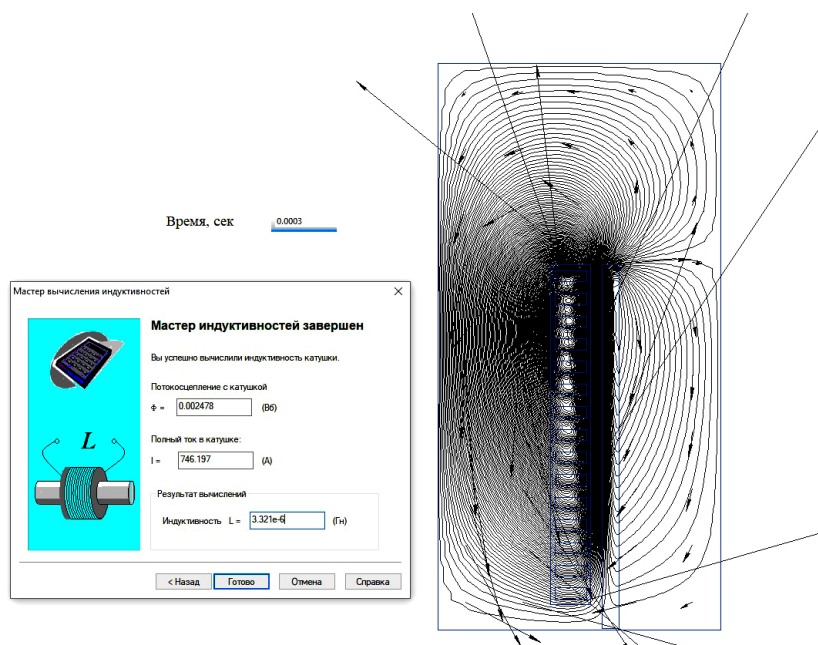


Рис. 5. Максимальная глубина проникновения взаимных полей взаимодействия индуктора и якоря

Fig. 5. Maximum penetration depth of mutual fields of interaction of the inductor and the armature

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

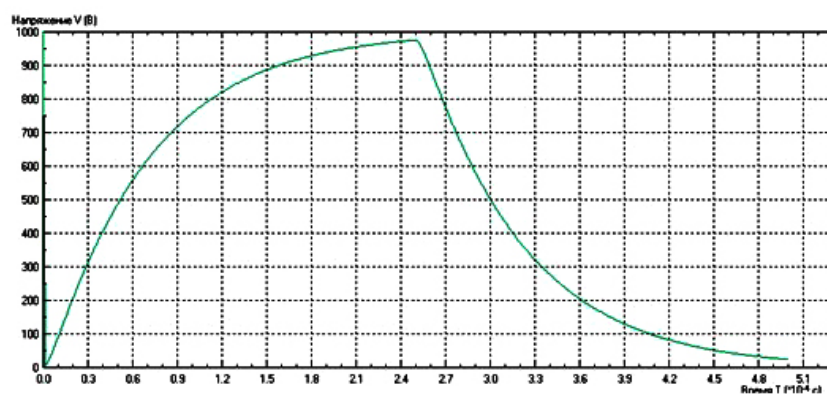


Рис. 6. Разряд конденсатора на индуктор

Fig. 6. Discharge of the capacitor to the inductor

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Научная новизна, представленная в данной статье, состоит в том, что до настоящего времени недостаточно изучена природа и описаны процессы возникновения вихревых токов Фуко в якоре, их глубина проникновения, интенсивность и мощность созданного ими электромагнитного поля. Их программное моделирование, представленное ниже, позволяет приблизиться к достижению решения этой задачи.

Результаты и их обсуждение

Решение связанной цепно-полевой задачи системы взаимодействия «плоский индуктор — плоский якорь» при обратной силе взаимодействия полей вихревых токов в пластине якоря на быстро возрастающее поле плоской катушки индуктора рассмотрим в комплексе программ ELCUT 6.0 Professional. Ниже представлены исходные данные модели, которые соответствуют физическому образцу электроимпульсной установки, используемой в натурных испытаниях и исследованиях.

Индуктор выполнен в виде спирали из 20 последовательно соединенных витков сечением 5×1,5 мм. Ось симметрии модели, совпадающая с её нижней границей, использовалась для построения расчётной области, представляющей половину конструкции. Геометрические параметры якоря составляют 41,3 мм, а воздушный зазор между активными элементами системы задан равным 1 мм. В ходе эксперимента получен ряд ключевых зависимостей, включая динамику тока в индукторе при использовании якорей из различных материалов; изменение напряжения на ёмкостном накопителе; распределение плотности тока в проводящих элементах системы (индукторе и якоре). На основании анализа результатов моделирования определена максимальная глубина проникновения взаимоиндукционных полей, графически представленная на рис. 5. Все геометрические и параметрические параметры модели исследования взяты из существующей физически экспериментальной установки, которая успешно функционирует для очистки от наледи

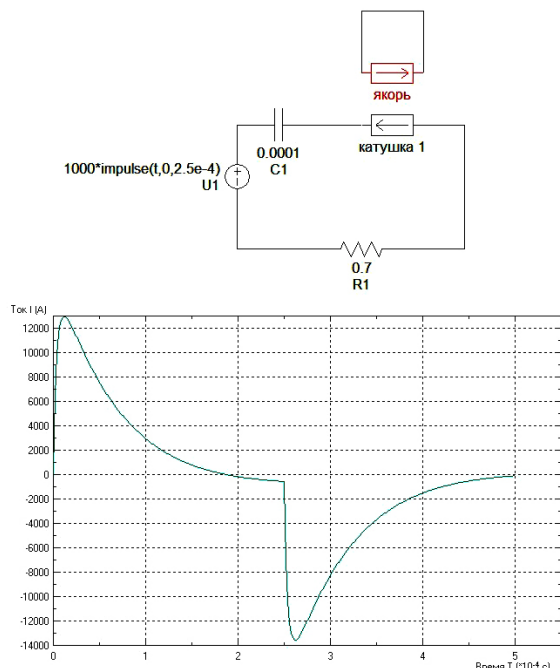


Рис. 7. Временная характеристика пиковых значений плотности вихревых токов в якоре
Fig. 7. Temporal features of peak values of eddy current density in the armature
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

карнизов наклонных кровель ввиду образования опасных ледяных образований, которые необходимо контролируемо очищать. Именно в ходе разработки указанного опытного образца были получены оптимальные инженерные решения по материалу обмоток индуктора, его форме; рассчитана электрическая принципиальная схема и ее параметры; выбран материал, форма и толщина пластины якоря.

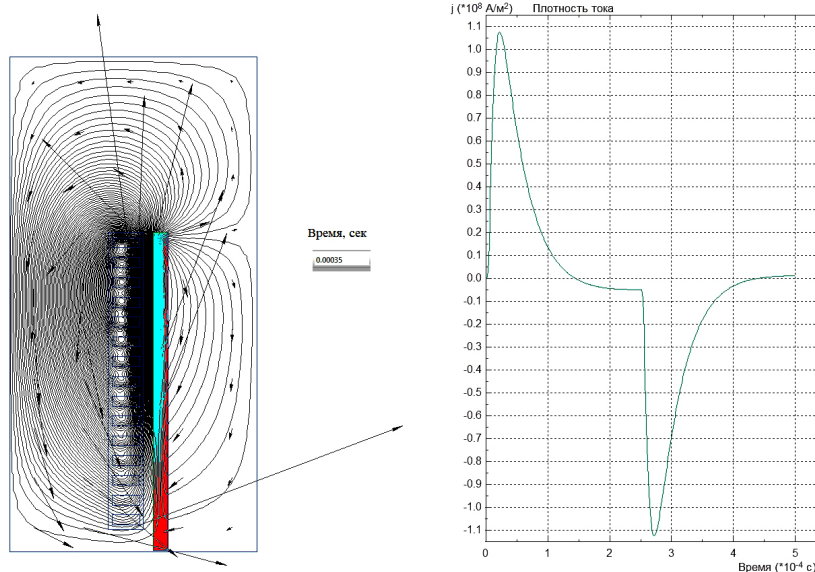


Рис. 8. Временная характеристика пиковых значений плотности вихревых токов в якоре совместно с картиной магнитных линий взаимодействия полей системы «индуктор–якорь»
Fig. 8. Temporal features of the peak eddy current density in the armature, combined with the magnetic flux pattern (magnetic field lines) of the interaction fields in the inductor and armature system

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

В ходе работы над проектированием опытного образца были полностью разобраны все физические процессы, протекающие в импульсной системе «плоский индуктор — плоский якорь».

Результаты решения сопряжённой задачи нестационарного магнитного поля с учётом внешней электрической цепи дают количественную оценку эффективности и полезной работы поля, создаваемого индуктором [7–15]. Данный подход позволяет установить прямую корреляцию между параметрами цепи, конфигурацией генерируемого поля и результирующей картиной распределения магнитной индукции в плоском якоре. В процессе решения были получены результаты мгновенных максимальных значений и пика магнитной индукции, создаваемых плоским индуктором при разряде высоковольтного конденсатора при максимальном заряде в 1 кВ. Следует понимать, что именно высокое напряжение вместе с явлением резонанса системы «ёмкость — индуктивность» создаёт эффект кратного усиления мощности электромагнитного взаимодействия. Все временные характеристики параметров колебательного контура в резонансе электрической системы «конденсатор — индуктор» указывают на пиковые значения образования вихревых токов в плоском якоре. Именно это сочетание параметров позволяет создать максимальные токи Фуко в якоре, обеспечить максимальную силу противодействия нарастающему нестационарному полю индуктора и, самое главное, — вызвать усиление мощности до 10^6 и более за счёт резонансных явлений, моделируя механическое ускорение и создавая эффект импульсного ударного воздействия на объект очистки, а также обеспечивая поступательное движение с ускорением для других целей. Временная характеристика разряда конденсатора на индуктор представлена на рис. 6.

В рамках исследования было проведено исследование с целью зафиксировать время наиболее эффективного взаимодействия системы «индуктор — якорь», проявляющееся в силе $F_{эм}$ отталкивания

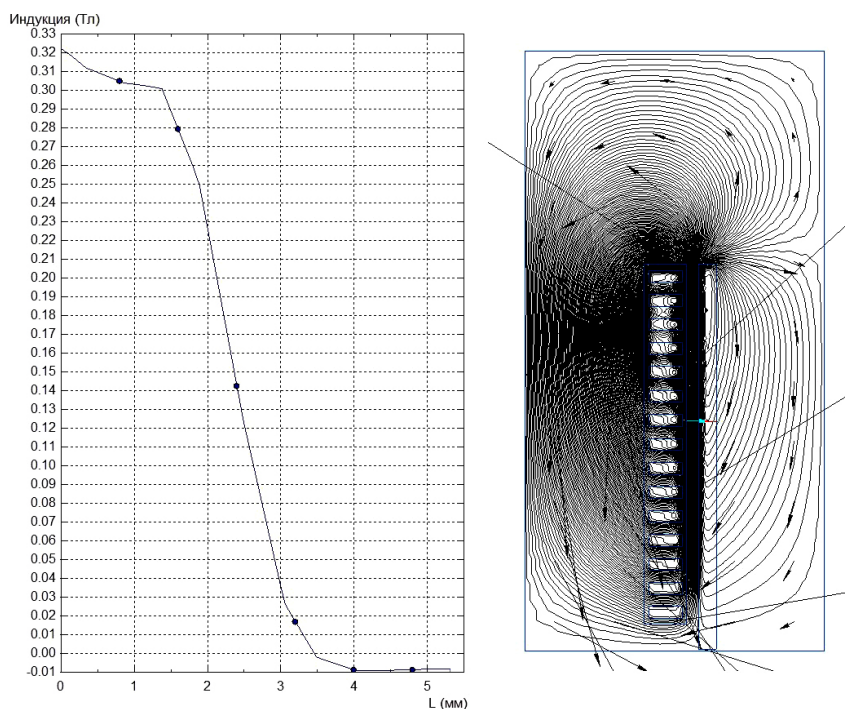


Рис. 9. Исследование неравномерности проникновения магнитного поля индуктора в токопроводящую пластину якоря в корреляции с индукцией от вихревых токов якоря

Fig. 9. Study of the non-uniformity of inductor magnetic field penetration into a conductive armature plate in correlation with the magnetic flux density induced by the armature's eddy currents

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

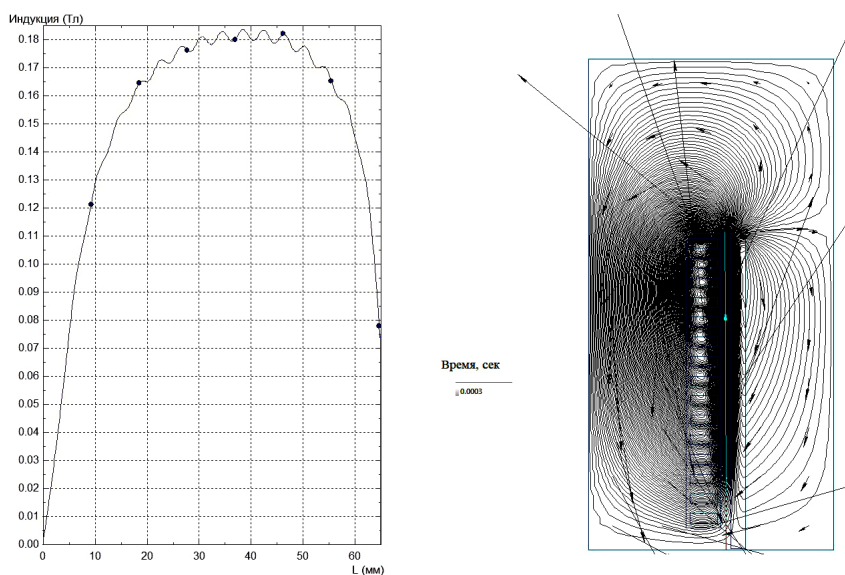


Рис. 10. Исследование неравномерности проникновения магнитного поля индуктора в токопроводящую пластину якоря в корреляции с индукцией поля индуктора

Fig. 10. Study of the non-uniformity of inductor magnetic field penetration into the conductive armature plate in correlation with the inductor's magnetic flux density

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

пластины от индуктора в своем пиковом значении в соответствии с законом Ампера (правило левой руки). Время составило $2,62 \cdot 10^{-4}$ с. Исследование основано на временной характеристике пиковых значений плотности вихревых токов в якоря, наглядно представленных на рис. 7 и 8. Более того, такое небольшое время отклика возникновения силы отталкивания в моменте полезной мощности применения этого явления не разрушает кристаллическую решетку материала, на который воздействует

якорь. Отрицательные значения показаний определяются из закона направления индуцированной электродвижущей силы по правилу Э. Х. Ленца. Из этого следует, что в зазоре между плоским индуктором (катушкой) и токопроводящей пластиной (якорем) преобладает тангенциальная составляющая вектора напряженности магнитного поля к поверхности токопроводящей плоской пластины, что подтверждается взаимодействием полей индуктора и якоря и порождает силу отталкивания. Образовав-

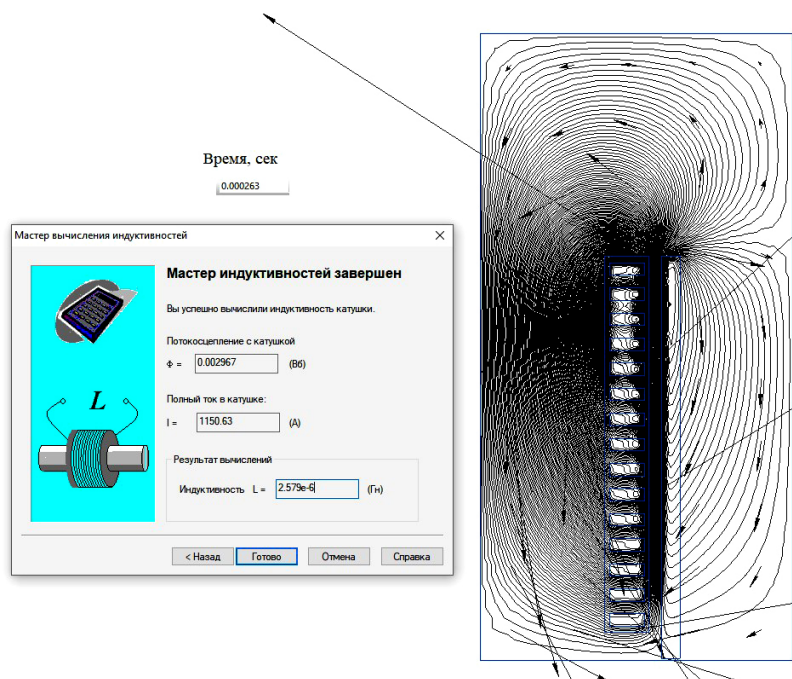


Рис. 11. Максимальная глубина проникновения взаимных полей взаимодействия индуктора и якоря в пике взаимодействия системы «плоский индуктор–плоский якорь»

Fig. 11. Maximum penetration depth of the mutual interaction fields of the inductor and armature at the interaction peak in the "flat inductor–flat armature" system

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

шаяся механическая энергия и является следствием электромагнитного взаимодействия системы, совершая полезную работу при различных применениях рассматриваемой установки. Главным фактором является время возникновения и совершения работы по перемещению, то есть время отклика, или быстродействие. Указанное быстродействие не позволяет нарушиться связям атомов структуры поверхности воздействия, создавая только волновые процессы механических упругих деформаций между налипшим материалом и непосредственно поверхностью воздействия.

На рис. 9–11 представлены результаты исследования неравномерности проникновения магнитного поля индуктора в токопроводящую пластину якоря. Максимальная глубина проникновения показана в черно-белой палитре с изменяющейся контрастностью цвета. Более того, исследование позволяет определять области в якоря с максимальной амплитудой плотности тока, которая является причиной возникновения токов Фуко, запускающих процесс взаимодействия. Плотность тока косвенно указывает на количество независимых замкнутых контуров, по которым и протекают образовавшиеся вихревые токи.

При отсутствии ферромагнитных сред в системе взаимодействия «плоский индуктор–плоский якорь» можно принять допущение, что индуктивность индуктора в процессе разряда остается величиной постоянной. Результаты численного моделирования нестационарного магнитного поля, выполненного в программном комплексе ELCUT 6.0 Professional для процесса разряда индуктора, подтверждают выдвинутую гипотезу.

Выводы

На основе результатов моделирования были получены следующие выводы:

1. Применение комплекса программ ELCUT 6.0 Professional для решения сопряженной задачи нестационарного электромагнитного поля и электрической цепи электроимпульсной установки позволяет достоверно воспроизвести динамику взаимодействия магнитных полей в системе «плоский индуктор–плоский якорь». Данный подход дает возможность определить временные характеристики процесса, которые проявляются в формировании электромагнитной силы $F_{эм}$ отталкивания пластины от индуктора, достигающей пиковых значений в соответствии с законом Ампера [1, 2]. Направление этой силы определено по правилу Ленца, и ее вектор соответствует назначению установки при максимальной силе воздействия и быстродействии возникновения.

2. В результате моделирования определено время максимальной силы $F_{эм}$ отталкивания пластины от индуктора в своем пиковом значении. Время составило $2,62 \cdot 10^{-4}$ с, что также подтверждается временной характеристикой плотности вихревых токов, образованных в плоском якоря в результате воздействия на него импульсного магнитного поля плоского индуктора. Благодаря быстродействию вместе с явлением резонанса обеспечивается эффект кратного усиления мощности преобразования энергии электромагнитного поля в силу отталкивания якоря.

3. Результаты проведенного моделирования оказывают существенное влияние на технико-экономические показатели устройств, принцип работы которых основан на взаимодействии магнитного поля индуктора с вихревыми токами, наводимыми в якоря. Такое небольшое время отклика возникновения силы отталкивания, составляющее $2,62 \cdot 10^{-4}$ с, в момент полезной мощности применения этого явления не разрушает кристаллическую решетку материала в соответствии с теорией ма-

териаловедения, на который воздействует якорь. Эффективность применения рассмотренного явления позволяет разрабатывать новые методы проектирования ударных установок для нужд промышленности, энергетики и жилищно-коммунального хозяйства. Стоит также обратить внимание на коэффициент полезного действия системы взаимодействия «индуктор—якорь». Так как для создания магнитного поля индуктором применяется высоковольтный конденсатор, то создается ряд эффективных преимуществ для рассматриваемого вида взаимодействия по сравнению с другими способами обеспечения взаимодействия.

При правильно подобранных параметрах элементов системы имеет место явление резонанса и, как следствие, усиление полезной мощности. При этом достигается высокая энергетическая эффективность за счет малого времени и небольшой энергии, необходимой для заряда высоковольтного конденсатора. Используемое для заряда высоковольтного конденсатора устройство также имеет уникальную разработанную схемотехнику, которая позволяет поддерживать высокую энергетическую эффективность.

Заключение

Экспериментальные исследования сопряжены со сложностью измерения токов Фуко в движущемся якоре, поэтому ключевое внимание уделялось методам и способам моделирования и расчета, а также оценке неопределенности измерений параметров, позволяющих представить полную картину электродинамического процесса. Ключевой особенностью систем типа «плоский индуктор—плоский якорь» является реализация принципа концентрации энергии во времени, а также высокой энергетической эффективности системы взаимодействия. Относительно быстрого действия времени возникновения силы отталкивания якоря, длительный этап аккумуляции энергии в накопителе сменяется ее высвобождением в сверхкоротком интервале, что обеспечивает достижение экстремальных значений импульсного механического воздействия на поверхность.

Однако это не приводит к разрушениям атомных связей кристаллической решетки поверхности, на которую направлено механическое воздействие якоря, а вызывает только волновые процессы упругой деформации по поверхности, что позволяет разрушить адгезионные связи на ней. Рабочее напряжение на емкостном накопителе в таких системах может достигать 5 кВ и более. По принципу действия данные электроимпульсные системы классифицируются как устройства ударного типа, что позволяет их использовать для решения различных задач в промышленности, энергетике и даже в жилищно-коммунальном комплексе.

Сравнительный анализ с альтернативными технологиями (вибрационными, электромагнитными или пневматическими ударными механизмами) демонстрирует их превосходство как по энергетической эффективности технологических операций (например, очистки), так и по коэффициенту полезного действия преобразования электрической энергии в механическую работу. Данное исследование позволяет подтвердить натурные эксперименты, уточнить геометрические и электрические параметры установки системы взаимодействия «индуктор—якорь».

Список источников / References

1. Верещагин И. П., Смагин К. А., Чекалов А. В. [и др.]. Анализ процессов очистки отходящих газов в пластинчатых электрофильтрах с учетом вторичного уноса частиц с электродами // *Электротехника*. 2017. № 8. С. 57–65. EDN: YUTIMV.
2. Vereshchagin I. P., Smagin K. A., Chekalov A. V. [et al.]. Analiz protsessov oчитки otkhodyashchikh gazov v plastinchatykh elektrofilytrakh s uchetom vtorichnogo unosa chastits s elektrodov. *Elektrotehnika*. 2017;8:57–65. EDN: YUTIMV. (In Russ.).
3. Rzaeva S. V. Features of Electrodeless Electrochemical Reactions. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2023;59:590–594. <https://doi.org/10.3103/s1068375523050150>. EDN: DGNJER.
4. Ахмедов Э. Н., Сафиев С. Э., Рзаева С. В. Инновационные методы электроимпульсной очистки химических жидкостей для синтеза полимерных материалов с заданными свойствами // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2025. № 1 (430). С. 204–217. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2025.01.204-217>. EDN: CEMFRZ.
5. Ahmedov E. N., Safiyev S. E., Rzaeva S. V. Innovative methods of electrodischarge purification of chemical liquids for the synthesis of polymeric materials with predefined properties. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2025;1(430):204–217. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2025.01.204-217>. EDN: CEMFRZ. (In Russ.).
6. Khasenov A. K., Nusupbekov B. R., Kusainov K. K. Electro-impulse Method of Surface Cleaning. *Life Science Journal*. 2013;10(12):1–5.
7. Vishnyakov V. I. Pulsed high-voltage electrical discharges in water: The resource for hydrogen production and water purification. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(25):12500–12505. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.015>.
8. Кочеткова В. С., Смирнов Б. Ю. Сопряженная очистка отходящих дымовых газов от оксидов азота и углерода: проектные исследования // *Альманах современной науки и образования*. 2016. № 3 (105). С. 56–58. EDN: VOFDDN.
9. Kochetkova V. S., Smirnov B. Yu. Coupled purification of flue gases from nitrogen and carbon oxides: project study. *Almanac of Modern Science and Education*. 2016;3(105):56–58. EDN: VOFDDN. (In Russ.).
10. Захаренко В. А., Захаренко В. В., Николаев М. Ю., Шкаев А. Г. Электроимпульсная очистка карнизов // *Омский научный вестник*. 2019. № 5 (167). С. 77–81. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-167-77-81>. EDN: EAMEGF.
11. Zakharenko V. A., Zakharenko V. V., Nikolaev M. Yu., Shkayev A. G. Electric pulse cleaning of cornices. *Omsk Scientific Bulletin*. 2019;5(167):77–81. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-167-77-81>. EDN: EAMEGF. (In Russ.).
12. Khajouei R., Keramat J., Hamdami N. [et al.]. Effect of high voltage electrode discharge on the physicochemical characteristics of alginate extracted from an Iranian brown seaweed (Nizimuddinina zanardini). *Algal Research*. 2021;56:102326. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102326>. EDN: BPVEAW.
13. Alkhadra M. A., Su X., Suss M. E. [et al.]. Electrochemical Methods for Water Purification, Ion Separations, and Energy Conversion. *Chemical Reviews*. 2022;122(16):13547–13635. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00396>. EDN: RLWRKI.
14. Bereziuk A., Karlov O., Kryshchuk R. [et al.]. Vortex currents and magnetic forces of non-magnetic plate in the process of magneto-pulse treatment on the ideal ferromagnetic platform. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023;1(5):10–14. <https://doi.org/10.15199/48.2023.05.02>.
15. Bahramian B., Ma Y., Rohanizadeh R. [et al.]. A new solution for removing metal-based catalyst residues from a biodegradable polymer. *Green Chemistry*. 2016;18(13):3740–3748. <https://doi.org/10.1039/c5gc01687h>.
16. Whiba R., Su'ait M. S., Ahmad A. An affordable and easily accessible approach for acrylonitrile monomer purification through a simple column technique. *Journal of Materials Science*

and *Chemical Engineering*. 2024;12(4):18–28. <https://doi.org/10.4236/msce.2024.124002>. EDN: IGLZPI.

13. Makarov V. V., Kuznetsova O. P., Nikolaev M. Y. Issues and tasks of electro-impulse cleaning. *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020)*. 2020. P. 283–285. <https://doi.org/10.1109/EFRE47760.2020.9242109>. EDN: ZWDHKA.

14. Захаренко В. А., Татевосян А. С., Захарова Н. В. [и др.]. Расчет нестационарного магнитного поля электроимпульсной установки очистки угольной пыли с поверхности электростатических фильтров // *Промышленная энергетика*. 2019. № 12. С. 19–29. EDN: DGEQWH.

Zakharenko V. A., Tatevosyan A. S., Zakharova N. V. [et al.]. Raschet nestatsionarnogo magnitnogo polya elektroimpul'snoy ustanovki oчитки ugol'noy pyli s poverkhnosti elektrostatischeikh fil'trov. *Promyshlennaya Energetika*. 2019;12: 19–29. EDN: DGEQWH. (In Russ.).

15. Diaz I., Ovejero G., Romero M. D. [et al.]. Purification process design in the production of styrene monomer. *Chemical Engineering and Processing*. 2010;49(4):367-375.

Вклад авторов:

М. Ю. Николаев. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, определение исходных данных для построения математической модели в программном комплексе ELCUT 6.0 Professional, анализ электромагнитного взаимодействия основных элементов электроимпульсной установки, общее редактирование текста и формулировка выводов.

А. А. Татевосян. Разработка имитационной математической модели электроимпульсной установки, ввод исходных параметров в программном комплексе ELCUT 6.0 Professional, вывод и обработка результатов.

Authors' contribution:

Mikhail Yu. Nikolaev. Setting goal, research objectives and scientific problems, determining the initial data for constructing a mathematical model in the ELCUT 6.0 Professional Software Package, analysing the electromagnetic interaction of the main elements of an electric pulse installation, general text editing and conclusions drawing.

Andrey A. Tatevosyan. Development of a mathematical simulation model of an electric pulse installation, input of initial parameters in the ELCUT 6.0 Professional Software Package, results processing.

Информация об авторах:

НИКОЛАЕВ Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1649-8920

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3046-2092>

AuthorID (SCOPUS): 57193405906

ResearcherID: Y-9077-2018

e-mail: munp@yandex.ru

ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6456-8370

AuthorID (РИНЦ): 163175

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0891-9244>

AuthorID (SCOPUS): 56503745000

ResearcherID: M-3175-2015

e-mail: aatatevosyan@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.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 10.04.2026; принята к публикации 14.09.2026.

Information about the authors:

NIKOLAEV Mikhail Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 1649-8920

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3046-2092>

AuthorID (SCOPUS): 57193405906

ResearcherID: Y-9077-2018

e-mail: munp@yandex.ru

TATEVOSYAN Andrey Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 6456-8370

AuthorID (RSCI): 163175

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0891-9244>

AuthorID (SCOPUS): 56503745000

ResearcherID: M-3175-2015

e-mail: aatatevosyan@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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 01.12.2025; approved after reviewing 10.04.2026; accepted for publication 14.09.2026.

ПРОБЛЕМЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ ОТКАЗОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Л. А. Паюк¹, Н. А. Воронина¹, А. В. Глазачев¹,
А. Д. Умурзакова², К. В. Хацевский³✉

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

²Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
Республика Казахстан, 010011, г. Астана, пр. Женис, 62

³Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

✉ xkv-post@rambler.ru

В работе рассмотрен актуальный вопрос применения нейросетевой диагностики как вспомогательного элемента комплекса мер по выявлению отказов асинхронного электропривода виброщековой дробилки для дробления минеральных удобрений. Особенностью данного оборудования является способность создавать мощные вибрационные нагрузки, необходимые для эффективного разрушения материала, при этом сохраняя надёжность и простоту конструкции.

Согласно статистическим данным, до 95 % асинхронных двигателей, устанавливаемых в виброщековых дробилках для дробления минеральных удобрений, составляют машины мощностью от 75 до 250 кВт. Эти двигатели наиболее подвержены действию агрессивной среды, влажности и перепадам температур и повышенным вибрационным нагрузкам, что приводит к выходу из строя в первую очередь механической части оборудования и стержней обмоток статора.

Обозначены основные проблемы применения метода нейросетевой диагностики оборудования, разработан алгоритм прогнозирования отказов исполнительного двигателя, а именно обрыв стержней в фазах статора асинхронного двигателя, который работает, как приводной для виброщековой дробилки минеральных удобрений. Приведена методика их оценки, а также развернутый алгоритм, который позволяет исключить ряд характерных отказов для данного оборудования, повысив эффективность использования асинхронного электропривода в данной отрасли.

В ходе исследования были получены рекомендации по работе и настройке рассматриваемого нейросетевого алгоритма диагностики асинхронного двигателя на предмет наличия обрыва стержней статора.

Ключевые слова: отказ, аварийный режим, электропривод переменного тока, асинхронный двигатель, диагностика неисправностей, комбинированный метод, алгоритм, нейросеть

Для цитирования: Паюк Л. А., Воронина Н. А., Глазачев А. В., Умурзакова А. Д., Хацевский К. В. Проблемы цифровизации отказов асинхронного электропривода в сельском хозяйстве. Омский научный вестник. 2026. № 3 (199). С. 97–105. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-97-105>. EDN: BEMXLJ.



© Паюк Л. А., Воронина Н. А., Глазачев А. В.,
Умурзакова А. Д., Хацевский К. В., 2026.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROBLEMS OF DIGITALIZING FAILURE ANALYSIS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES IN AGRICULTURE

L. A. Payuk¹, N. A. Voronina¹, A. V. Glazachev¹,
A. D. Umurzakova², K. V. Khatsevskiy³✉

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina Ave., 30, Tomsk, 634050, Russia

²S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University,
Zhenis Ave., 62, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan

³Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

✉ xkv-post@rambler.ru

The paper examines the relevant issue of using neural network diagnostics as an auxiliary element of a set of measures to detect failures of the asynchronous electric drive of a vibratory jaw crusher used for crushing mineral fertilizers. A distinctive feature of this equipment is its ability to generate powerful vibration loads necessary for the effective destruction of the material, while maintaining the reliability and simplicity of the design.

According to statistical data, up to 95 % of asynchronous motors installed in vibratory jaw crushers for crushing mineral fertilizers are machines with a power output ranging from 75 to 250 kW. These motors are most susceptible to the effects of aggressive environments, humidity, temperature fluctuations and increased vibration loads, which primarily leads to the failure of the mechanical parts of the equipment and the stator winding bars.

The authors demonstrate the main problems of applying the method of neural network diagnostics of equipment and develop an algorithm for predicting failures of the actuator, namely, rod breakage in the phases of the stator of an asynchronous motor that operates as a drive for a vibrating jaw crusher of mineral fertilizers. Moreover, the research presents the assessment methodology with an expanded algorithm that allows eliminating a number of typical failures for this equipment, thereby increasing the efficiency of using an asynchronous electric drive in this industry.

The research produced guidelines for operating and configuring the neural network algorithm designed to detect broken stator bars in an asynchronous motor.

Keywords: failure, emergency mode, AC electric drive, asynchronous motor, fault diagnosis, combined method, algorithm, network model

For citation: Payuk L. A., Voronina N. A., Glazachev A. V., Umurzakova A. D., Khatsevskiy K. V. Problems of digitalizing failure analysis of asynchronous electric drives in agriculture. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):97–105. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-97-105>. EDN: BEMXLJ.



© Payuk L. A., Voronina N. A., Glazachev A. V.,
Umurzakova A. D., Khatsevskiy K. V., 2026.

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

Введение

Повсеместно заметна тенденция внедрение современных цифровых технологий, таких как нейронные сети (НС), виртуальная реальность (VR) и искусственный интеллект (ИИ) и в повседневной жизни, и в отдельных отраслях промышленности [1]. Исключением не стала и отрасль сельского хозяйства [2, 3]. Например, в Японии внедрение НС и цифрового сельского хозяйства идёт последние 15–20 лет [4].

Более 95 % оборудования для данной отрасли построено на базе асинхронного электропривода. Мощность применяемых в сельском хозяйстве электродвигателей находится в диапазоне от 0,18 до 160 кВт [2].

Для эффективного использования рассматриваемых электроприводов применяют энергоэффективные асинхронные двигатели (АД) серии 7А, отличительной особенностью которых является увеличенный КПД при тех же условиях эксплуатации. Следует отметить, что условия эксплуатации сельхозоборудования разнятся в нашей

стране как по влажности, так и по температурным показателям. Объединяют их одни проблемы, а именно перекося фаз (зачастую вследствие пониженного напряжения сети до 168 В — напряжение одной фазы), несимметрия, изношенность сетей, периодические отключения электроэнергии [5–10]. Всё это сказывается на скорости внедрения указанных технологий в сельхозоборудовании. Следовательно, НС и ИИ должны быть вспомогательными инструментами в создании технологичного сельхозоборудования наравне с традиционными способами диагностики неисправностей, такими как анализ звука; контроль температуры; вибродиагностика (дисбаланс ротора, поломка подшипников или нарушение соосности); измерение электрических параметров (напряжение и ток, наличие дисбаланса между фазами, коэффициент мощности $\cos \varphi$ — низкий может указывать на проблемы с нагрузкой); визуальный или тепловизионный осмотр (повреждение корпуса, состояние кабельных соединений, чистота системы охлаждения; воздуховоды и вентилятор) [11].

Анализ показал, что основные причины неисправностей, которые возникают в асинхронном электроприводе, можно разделить на следующие группы:

- качество электроэнергии;
- механическая часть;
- преобразователь частоты ПЧ;
- внутренние повреждения АД;
- неправильная установка.

О качестве электроэнергии говорилось выше. Отметим, что большинство явлений, связанных с данной группой (переходное напряжение, асимметрия, гармонические искажения) приводят к нарушению изоляции исполнительного двигателя, перегреву и дополнительным расходам, так как требуют дополнительного диагностирующего оборудования.

Механическая часть электропривода сельхозоборудования также существенно влияет на причины неисправности в системе, особенно на нарушение центрирования; дисбаланс и расшатанность вала; износ подшипников; рабочие перегрузки ввиду большого износа оборудования, что влечёт за собой простои и дополнительные расходы.

Электроприводы по системе ПЧ–АД широко распространены в различном оборудовании сельскохозяйственного назначения, в частности в дробилках, ситах, сушках, конвейерах, системах микроклимата для хранения овощей и зерна и т. д. Преобразователь частоты влияет на работу привода и может привести к неисправности асинхронного двигателя, например, отражения на выходных ШИМ-сигналах электропривода, которые возникают при несогласованности полных сопротивлений источника и нагрузки (неправильная установка, неправильный выбор компонентов и продолжительная работа); среднеквадратичное отклонение тока — паразитные токи, влияющие на произвольное замыкание цепи из-за прохождения тока по защитному заземлению, но влияние последнего незначительное.

Следует отметить, что неправильная установка электрооборудования тоже может привести к неисправности и простоям электропривода. Напри-

мер, неплотно прилегающее оборудование приводит к нарушению центрирования и, как следствие, к простоям. Если напряжение на валу электродвигателя превышает изолирующие характеристики смазки подшипника, то это приводит к локальному пробою и перегреву внешнего подшипника, появляются канавки на дорожке качения подшипника. Указанные неполадки возникают в результате подачи напряжения и при работе исполнительного двигателя.

В табл. 1 представлен краткий анализ сравнения методов диагностики неисправностей в АД.

Методика

Классификаций НС существует множество: по способу обучения, по типологии, по модели НС, по способу настройки весовых коэффициентов и т. д. [12]. В данном исследовании считаем, что наиболее полную информацию несет классификация по типу решаемых задач, которые ставятся перед НС, так как указанная классификация отражает обозначенные выше особенности.

На рис. 1 представлен вариант классификации НС по моделям и решаемым задачам. Отметим, что первые попытки применения НС в области диагностики неисправностей АД были сделаны в 1993 г. группой ученых из Италии [13]. У НС была задача сравнения исправных АД (данные лабораторных исследований) и неисправных, получаемых в результате моделирования.

Применение НС связано с трудностью диагностики в связи с большим числом дополнительного измерительного и регистрирующего оборудования, которое с легкостью заменяется на анализ косвенных параметров, таких как мгновенные значения токов, электромагнитного момента, угловой скорости вращения, амплитуды вибрации по осям (виброускорение) и т. д. Труднодиагностируемыми считаются задачи целостности обмоток, стержней, возникновение крутовой дуги и т. д. Диагностирование неполадок в стержнях АД является наиболее трудно определяемой неполадкой при стандартном осмотре неисправностей приводного двигателя. Учитывая особенности работы вибрационных

Таблица 1. Сравнение методов диагностирования неисправностей в АД
Table 1. Comparison of fault diagnosis methods in asynchronous motors

Метод диагностики	Достоинства	Недостатки	Стоимость тыс. руб.
Спектральный анализ	Точность до 85 %	1. Частота дискретизации от 1500 до 3000 Гц, для каждого отдельного узла АД определенная рабочая частота. 2. Невозможность использования во всех условиях работы оборудования	60 – 400
Вибродиагностика	Точность до 70 %	1. Диагностика только механических повреждений отдельных деталей электропривода. 2. Прямой доступ для установки вибродатчиков	80 – 500
Тепловизионная диагностика	1. Точность прогноза до 95 % и дистанционность. 2. Простота монтажа теплового реле (датчика)	1. Требуется установки датчика сразу при изготовлении АД. 2. Для АД закрытого исполнения неприменим. 3. Ограниченный перечень неисправностей для их установления	70 – 180
Визуальный осмотр	Простота	Точность менее 30 %	—
Методы диагностики параметров магнитного поля	Возможность определять как электрические, так и механические повреждения	Высокая чувствительность устройства к внешним электромагнитным полям	50 – 200
Диагностика с НС	Выявляет широкий спектр неисправностей	1. Сложность аппаратной части. 2. Необходимость наличия БД для корректного обучения НС	50 – 300

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

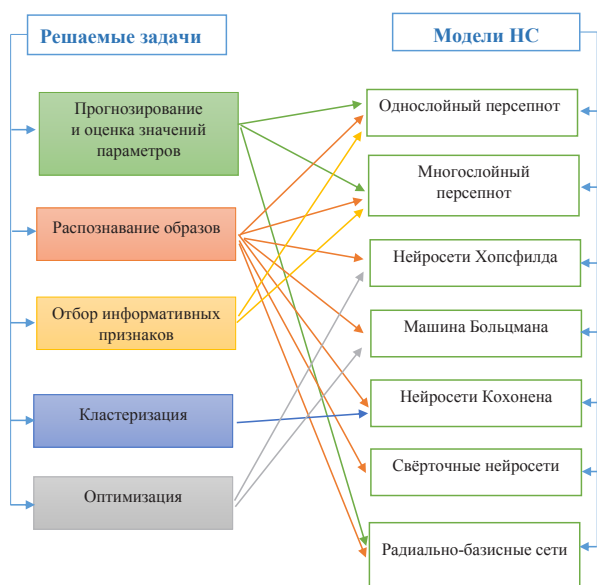


Рис. 1. Классификация моделей НС
Fig. 1. Classification of neural network models
Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

щечковых дробилок для дробления минеральных удобрений, где основные нагрузки — это ударные и вибрационные, возникает увеличение риска выхода из строя именно стержней АД (более 20 %, при 5 % общепромышленной эксплуатации) [6, 7, 14]. Обозначенные выше задачи решаются при помощи однослойных или многослойных моделей. Группой исследователей [15–17] была создана модель НС, которая обнаруживала в стержнях обрыв и межвитковое короткое замыкание за счёт сравнения текущего значения тока и его среднеквадратичного значения. На первом этапе первичная НС выполняет роль анализатора, сравнивая два тока, на основе анализа которых и предполагался неисправный стержень в АД. Пример сверточной НС представлен в работе [18], где реализован механизм обнаружения неисправностей путем сопоставления сигналов статора, записанных с трехфазного АД в установившемся режиме. Указанные сигналы используются для определения исправного состояния, а также состояний, требующих ремонта, которые отображаются в виде облака точек в трёхмерном пространстве с помощью вокселизации. Предложенный метод превосходит классический метод диагностики на основе глубокого обучения, поскольку он проецирует токи статора на двумерные RGB-изображения, что предотвращает коллапс данных.

НС для оптимизации задач, связанных с неисправностями в роторе АД, также применяются, но с более сложной структурой, возможностью обучения в процессе работы НС, наличием обратных связей между обучающей и обучаемой системами через буфер накопленной информации с вычленением необходимой НС, построенной по алгоритму Хопсфилда [19, 20].

Методы и средства НС диагностики параметров асинхронных двигателей и электроприводов на их основе достаточно обширны [21–27], но имеют общие недостатки:

- разная чувствительность к изменениям основных рабочих параметров и режимов работы АД;

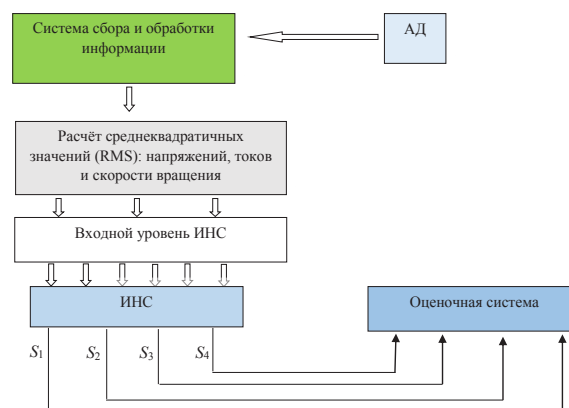


Рис. 2. Общий алгоритм диагностики неисправности при помощи НС

Fig. 2. General algorithm for fault diagnosis using neural networks

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

- невозможность своевременно отследить энергетические показатели исполнительного двигателя;

- сложность реализации при наличии большого числа контролируемых параметров в АД, в силовой и механических частях;

- наличие рассогласованности между частями блока анализа и оценки;

- отсутствие унификации;

- постоянное обучение;

- наличие серверного узла с большой оперативной памятью.

Следовательно, попытаемся создать искусственную нейронную сеть (ИНС) для прогнозирования неисправностей в АД вибрационных щечковых дробилок для дробления минеральных удобрений, который является наибольшим источником неисправностей в рассматриваемом оборудовании [6, 12, 28, 29].

Более 80 % неисправностей в сельхозоборудовании АД приходится на повреждение обмотки статора и возникновение коротких замыканий. Для решения данной задачи воспользуемся наработками в данной области и разработаем алгоритм создания НС (рис. 2) для определения дефектов и неисправностей в статоре АД.

Особенностью НС будем считать наличие базы данных (БД), которая будет задавать эталонное значение (ток в фазах статора при нормальной работе), и блок оценки, где будет происходить сравнение текущего среднеквадратичного значения тока фазы статора с последующим обучением НС (в случае возникновения обрыва стержня от 1 до n). На входной уровень нейронной сети поступают среднеквадратичные значения параметров.

Аналитически такой подход можно описать выражениями (1) и (2) для определения среднеквадратичного значения (RMS):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt}, \quad (1)$$

то есть RMS — корень из суммы квадратов действительных значений синусоидального напряжения или тока:

$$RMS \cong \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} u_i^2}. \quad (2)$$

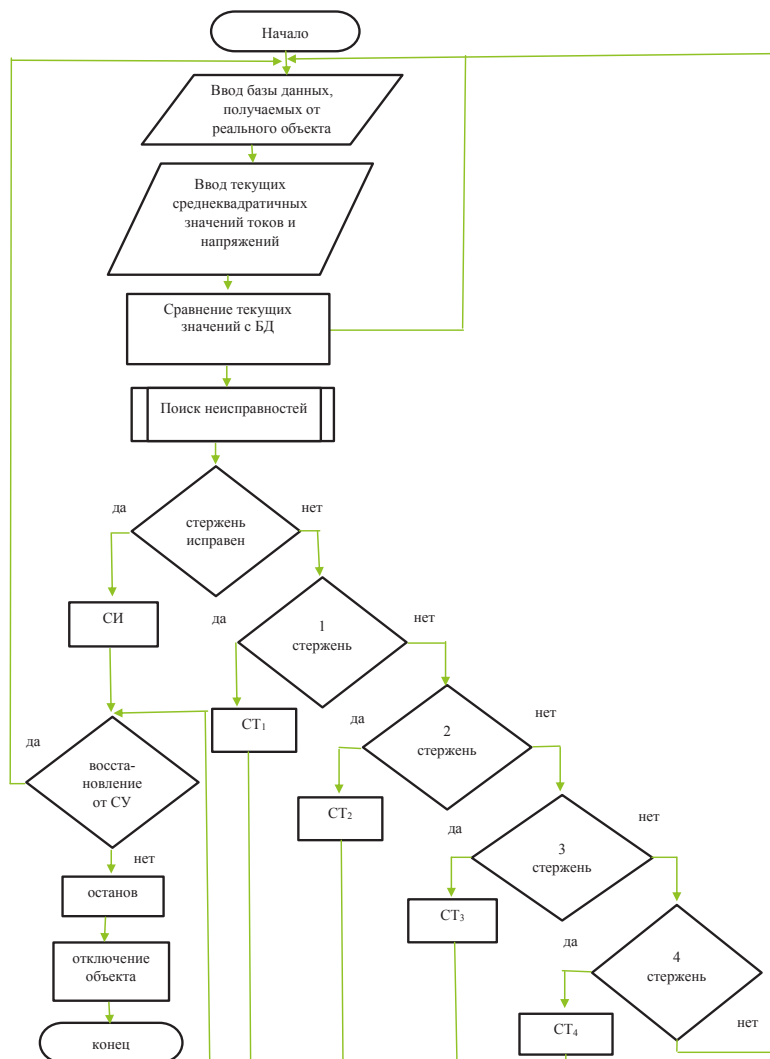


Рис. 3. Развёрнутый алгоритм диагностики неисправности при помощи НС

Fig. 3. Detailed fault diagnosis algorithm using neural networks

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Таблица 2. Классификация режимов работы
Table 2. Classification of operating modes

Состояние двигателя	Символ	Код			
		S_1	S_2	S_3	S_4
Исправное	СИ	0	0	0	0
Сломан 1 стержень	СТ ₁	1	0	0	0
Сломано 2 стержня	СТ ₂	0	1	0	0
Сломано 3 стержня	СТ ₃	0	0	1	0
Сломано 4 стержня	СТ ₄	0	0	0	1

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

При оцифровывании сигнал разбивается на шаги и аппроксимируется с шагом N .

Зачастую, когда стержень фазы статора АД повреждён, в данной области ослабевает магнитное поле, что приводит к ослаблению тока, проходящего через стержень и, как следствие, происходит формирование неоднородного поля ротора (колебания тока статора), которое может привести к падению электромагнитного момента. Отметим, что амплитуда колебаний тока в фазе статора тем выше, чем больше количество неисправных стержней. БД формировалась из открытых источников [28, 29].

Представим базу для обучения НС в виде класса векторов (матрица) (табл. 1), где каждый класс отображает состояние асинхронного двигателя, а вектора — эффективные значения параметров $I_a, I_b, I_c, U_a, U_b, U_c$ и ω и, как следствие, обеспечивают входной уровень НС (рис. 2).

В табл. 2 показана классификация, которую получили в случае исправного и неисправного состояний. Отметим, что каждому состоянию двигателя соответствует определённый код ($S_1 - S_4$) и символ для обозначения уровня НС. Состояние системы «Исправно» — «СИ» (система исправна) имеет зна-

чение «0» под каждым номером стержня, а обозначение «СТ_л = 1» говорит о том, что стержень с соответствующим номером — сломан.

Результаты

На рис. 3 представлен развернутый алгоритм комплексного диагностирования неисправностей электродвигателя по среднеквадратичному значению токов и напряжений, построенный на основе табл. 2.

С помощью спектрального анализа питающего тока и данных по вибрации проводим комплексную диагностику электродвигателя и определяем значения параметров токов и напряжений для базы данных. Имеющиеся параметры разделяются на классы, которые отличаются друг от друга значениями исследуемых параметров в пределах от рабочих до критических с шагом в 15 % (например, ток фазы обмотки статора).

Процедура многопараметрического диагностирования электродвигателя включает в себя классификацию технического состояния и поиск неисправностей в случае, если текущие параметры достигают критических значений.

Работу алгоритма можно разделить на несколько этапов:

1. Начало алгоритма — сбор информации о данных по спектральному анализу и вибрации; ввод текущих среднеквадратичных значений токов и напряжений в фазы АД.

2. Процедура сравнения — выявление отклонений текущих параметров от значений в БД.

3. Поиск неисправностей в стержнях статора асинхронного двигателя, который ведется с согласованием работы оборудования и системы управления. Если стержень 1 исправен, то система переходит в состояние «СИ» в начало алгоритма, если неисправность подтвердилась и нет возможности восстановить от системы управления работу оборудования, то происходит «останов» и отключение объекта. Аналогичным образом происходит анализ неисправностей при выходе из строя стержня 2, 3 или 4 (режимы «СТ₂», «СТ₃» и «СТ₄», соответственно) при анализе параметров и отрицательном ответе на запрос при обработке алгоритма.

По представленному алгоритму (рис. 3) разрабатываются технические устройства, в состав которых должны входить первичные датчики, осуществляющие измерение диагностируемых параметров, и оборудование для обработки информации, обеспечивающее работу алгоритмов диагностирования и преобразующее результаты диагностики объекта.

Обязательным условием применения данного алгоритма оценки технического состояния электрооборудования на практике является наличие устройства сопряжения, на которое поступают данные с датчиков, а также достаточно мощный ноутбук с возможностью выхода в Интернет. В памяти носителя регистрируются данные с датчиков предварительно обработанного сигнала (перевод его в цифровой вид), который проходит программную обработку для контроля технического состояния объекта и выявления дефектов в режиме реального времени. При выявлении предаварийного технического состояния система диагностирования производит отключение поврежденного АД посредством блока управления.

Выводы

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы:

— применение НС в сочетании с традиционными способами диагностики неисправностей, возникающих в АД сельхозоборудования, позволяет увеличить срок службы оборудования;

— наиболее эффективно использование НС в системах ПЧ—АД, так как есть каналы управления и мониторинга в данных системах, что позволяет минимизировать дополнительную аппаратную часть, а следовательно, сэкономить финансовые средства предприятий.

Список источников / References

1. Балашов А. М. Цифровизация и использование искусственного интеллекта в производственных процессах современных предприятий // Теоретическая экономика. 2024. № 11. С. 34—41. <https://doi.org/10.52957/2221-3260-2024-11-34-41> EDN: UKMLFE.

Balashov A. M. Digitalization and the use of artificial intelligence in the production processes of modern enterprises. *Theoretical Economics*. 2024;11:34—41. <https://doi.org/10.52957/2221-3260-2024-11-34-41>. EDN: UKMLFE. (In Russ.).

2. Черникова Т. М., Дабаров В. В., Каченков А. К. Повышение энергоэффективности асинхронных двигателей // Техника и технология горного дела. 2024. № 1 (24). С. 77—86. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2024-1-77-86>. EDN: EVEQUJ.

Chemikova T. M., Dabarov V. V., Kachenkov A. K. Increasing the energy efficiency of asynchronous motors. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2024;1(24):77—86. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2024-1-77-86>. EDN: EVEQUJ. (In Russ.).

3. Kujawa S., Niedbala G. Artificial neural networks in agriculture. *Agriculture*. 2021;11(6):497. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060497>. EDN: ARJYSG.

4. Воробьева Н. А., Колесников М. В. Трансформации аграрного сектора Японии в рамках полномасштабной цифровизации // Известия Восточного института. 2022. № 3 (55). С. 144—158. <https://doi.org/10.24866/2542-1611/2022-3/144-158>. EDN: JOCIEK.

Vorobeveva N. A., Kolesnikov M. V. Transformation of the agricultural sector in Japan as part of full-scale digitalization. *Oriental Institute Journal*. 2022;3(55):144—158. <https://doi.org/10.24866/2542-1611/2022-3/144-158>. EDN: JOCIEK. (In Russ.).

5. Коробков И. Ф., Шилова Т. В. Особенности эксплуатации электродвигателей в сельском хозяйстве // Вестник НГИЭИ. 2011. № 3 (4). С. 122—132. EDN: PVEWSJ.

Korobkov N. F., Shilova T. V. The peculiarities of exploitation of the electric engines in agriculture. *Bulletin NGIEI*. 2011;3(4):122—132. EDN: PVEWSJ. (In Russ.).

6. Кожухов В. А., Стрижнев С. А. Обзор технологических отказов асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве // Вестник КрасГАУ. 2006. № 11. С. 199—202. EDN: KYHUIP.

Kozhukhov V. A., Strizhnev S. A. Obzor tekhnologicheskikh otkazov asinkhronnykh dvigateley v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve. *Bulletin of KSAU*. 2006;11:199—202. EDN: KYHUIP. (In Russ.).

7. Устинов М. А. Обзор существующих методов диагностирования электродвигателей // Форум молодых ученых. 2020. № 5 (45). С. 481—486. EDN: VINYRT.

Ustinov M. A. Review of existing diagnostic methods of electric motors. *Forum of Young Scientists*. 2020;5(45):481—486. EDN: VINYRT. (In Russ.).

8. Zapparoli I. O., Júnior A. M. G., Rossa A. J. [et al.]. Electrical current analysis for non-invasive early inter-turn short-circuit detection in FOC driven induction motors. *Measurement Science and Technology*. 2025;4(36):046117. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/adc1e9>. EDN: PPCCOW.

9. Iglesias Martínez M. E., Antonino-Daviu J. A., Dunai L. [et al.]. Higher-order spectral analysis and artificial intelligence

for diagnosing faults in electrical machines: An overview. *Mathematics*. 2024;12(24):4032. <https://doi.org/10.3390/math12244032>. EDN: IWOWMY.

10. Боннет Я. В., Логинов А. Ю., Прудников А. Ю. Особенности эксплуатации электродвигателей на птицефабрике // Актуальные вопросы аграрной науки. 2023. № 47. С. 8–17. [https://doi.org/10.51215/2411-6483-2023-\(2\)47-8-17](https://doi.org/10.51215/2411-6483-2023-(2)47-8-17). EDN: EHQBVC.

Bonnet Ya. V., Loginov A. Yu., Prudnikov A. Yu. Features of operation of electric motors at a poultry farm. *Electronic scientific-Practical journal "Actual issues of agrarian science"*. 2023;47:8–17. [https://doi.org/10.51215/2411-6483-2023-\(2\)47-8-17](https://doi.org/10.51215/2411-6483-2023-(2)47-8-17). EDN: EHQBVC. (In Russ.).

11. Хацевский К. В., Умурзакова А. Д., Воронина Н. А., Ичева Ю. Б. Анализ методов диагностирования неисправностей трехфазного асинхронного электродвигателя // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 42–46. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-42-46>. EDN: URHUMD.

Khatsevskiy K. V., Umurzakova A. D., Voronina N. A., Icheva Yu. B. The analysis of method for diagnosing faults of three-phase asynchronous motor. *Omsk Scientific Bulletin*. 2020;2(170):42–46. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-42-46>. EDN: URHUMD. (In Russ.).

12. Чичков Б. А., Раков П. И. Классификация искусственных нейронных сетей // Научный вестник МГТУ ГА. 2005. № 85. С. 82–87. EDN: JWVRNC.

Chichkov B. A., Rakov P. I. Klassifikatsiya iskusstvennykh neyronnykh setey. *Civil Aviation High Technologies*. 2005;85:82–87. EDN: JWVRNC. (In Russ.).

13. Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C. Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*. 1993;1:316–323.

14. Мугалимов Р. Г., Мугалимова А. Р., Калугин Ю. А., Одинцов К. Э. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в режиме его функционирования // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 70–78. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-70-78](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-70-78). EDN: YARKIX.

Mugalimov R. G., Mugalimova A. R., Kalugin Yu. A., Odintsov K. E. Method of inductions motor malfunction diagnostics and identification during operation. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2018;3(40):70–78. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-70-78](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-70-78). EDN: YARKIX. (In Russ.).

15. Gana M., Achour H., Belaid K. [et al.]. Non-invasive intelligent monitoring system for fault detection in induction motor based on bio piezoelectric sensor using ANN. *Measurement Science and Technology*. 2022;33(6):065105. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac4b8f>. EDN: TTEDUX.

16. Kerboua A., Kelaiaia R. Fault Diagnosis in an asynchronous motor using three-dimensional convolutional neural network. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024;49(3):3467–3485. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08025-y>. EDN: AZIUOJ.

17. Garcia-Calva T., Morinigo-Sotelo D., Fernandez-Caveiro V., Romero-Troncoso R. Early detection of faults in induction motors: A review. *Energies*. 2022;15(21):7855. <https://doi.org/10.3390/en15217855>.

18. Дробов А. В., Мирош Д. В., Галушко В. Н. Диагностика асинхронных электродвигателей с применением виброанализатора и сверточной нейронной сети // Энергетическая стратегия. 2024. № 1 (97). С. 38–41. EDN: SDUYXK.

Drobov A. V., Mirosh D. V., Galushko V. N. Diagnostika asinkhronnykh elektrodvigatelay s primeneniym vibroanalizatora i svertochnoy neyronnoy seti. *Energeticheskaya Strategiya*. 2024;1(97):38–41. EDN: SDUYXK. (In Russ.).

19. Capolino G.-A., Antonino-Daviu J. A., Riera-Guasp M. Modern diagnostics techniques for electrical machines, power electronics, and drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(3):1738–1745. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2391186>.

20. Fournier E., Picot A., Regnier J. [et al.]. Current-based detection of mechanical unbalance in an induction machine using spectral kurtosis with reference. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(3):1879–1887. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2341561>.

21. Баннов Д. М. Анализ методов диагностики обрыва стержня ротора асинхронного двигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17, № 3-4. С. 5–23. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-5-23>. EDN: HGBIQU.

Bannov D. M. Analysis of methods for diagnostics broken rotor bar of induction motor. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2021;17(3-4):5–23. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-5-23>. EDN: HGBIQU. (In Russ.).

22. Белоглазов Д. А. Особенности нейросетевых решений, достоинства и недостатки, перспективы применения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 7 (84). С. 105–110. EDN: KAPCWZ.

Beloglazov D. A. Features neurons decisions, merits and demerits, application prospects. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2008;7(84):105–110. EDN: KAPCWZ. (In Russ.).

23. Гришин Ф. С., Филимонов М. Н., Буганара С. Исследование возможностей создания системы диагностики параметров асинхронного двигателя мехатронного электрохимического модуля на основе искусственных нейронных сетей // Молодой исследователь Дона. 2023. Т. 8, № 3 (42). С. 15–17. EDN: SZKNGP.

Grishin F. S., Filimonov M. N., Bugarara S. Investigation of the possibilities of creating a system for diagnosing the parameters of an asynchronous motor of a mechatronic electromechanical module based on artificial neural networks (ANN). *Young Explorer of the Don*. 2023;8(3):15–17. EDN: SZKNGP. (In Russ.).

24. Середа Е. Г., Соловьев А. С. Определение неисправностей асинхронных двигателей с помощью алгоритмов машинного обучения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 261–272. <https://doi.org/10.17816/transsyst682000>. EDN: KMVRGF.

Sereda E. G., Solovyov A. S. Asynchronous motor fault detection using machine learning algorithms. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):261–272. <https://doi.org/10.17816/transsyst682000>. EDN: KMVRGF. (In Russ.).

25. Бирюков А. Э., Сорокин Д. Г. Математическая модель асинхронного электродвигателя с учетом насыщения и нагрева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3 (79). С. 58–76. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.3\(79\).58-76](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.3(79).58-76). EDN: EGQNKJ.

Biryukov A. E., Sorokin D. G. Mathematical model of an induction machine with consideration of saturation and heating. *Modern Technologies. System analysis. Modeling*. 2023;3(79):58–76. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.3\(79\).58-76](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.3(79).58-76). EDN: EGQNKJ. (In Russ.).

26. Houili M., Sahraoui M., Cardoso A. J. M., Alloui A. Zero-sequence voltage outperforms MCSA-STFT for a robust inter-turn short-circuit fault diagnosis in three-phase induction motors: A comparative study. *Machines*. 2025;13(6):501. <https://doi.org/10.3390/machines13060501>. EDN: IDCTAT.

27. Мирош Д. В. Нейросетевая обработка параметров состояния асинхронных двигателей при межвитковом замыкании // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 3 (51). С. 105–115. <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2024-3-9>. EDN: VHQXOB.

Mirosh D. V. Neural network processing of asynchronous motor state parameters in case of inter-turn closure. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;3(51):105–115. <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2024-3-9>. EDN: VHQXOB. (In Russ.).

28. Кучеренко Д. Е., Сторчак Н. В., Зубков С. С. О способах повышения надёжности электродвигателей сельскохозяй-

ственного назначения // Приднепровский научный вестник. 2025. Т. 6, № 2. С. 88–90. EDN: MLCQAC.

Kucherenko D. E., Storchak N. V., Zubkov S. S. O sposobakh povysheniya nadezhnosti elektrodvigately sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya. *Pridneprovskiy Nauchnyy Vestnik*. 2025;6(2):88–90. EDN: MLCQAC. (In Russ.).

29. Сторчевой В. Ф., Ахмедьянова Е. Н., Редников С. Н., Хайретдинова К. Т. Исследование потерь энергии и дефектов в электродвигателях при эксплуатации в АПК // Вестник НГИЭИ. 2025. № 11 (174). С. 56–66. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2025-11-56-66>. EDN: QQNJBO.

Storchevoy V. F., Akhmedyanova E. N., Rednikov S. N., Khayretdinova K. T. Investigation of energy losses and defects in electric motors during operation in agriculture. *Bulletin NGIEI*. 2025;11(174):56–66. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2025-11-56-66>. EDN: QQNJBO. (In Russ.).

Вклад авторов:

Л. А. Паюк. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, формулировка выводов, формулировка гипотезы о недостаточности существующих методик, выбор направления исследования, общее редактирование текста.

Н. А. Воронина. Выбор направления исследования, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами решения проблемы моделирования нейросетевых алгоритмов для диагностики асинхронных двигателей, общее редактирование текста.

А. В. Глазачев. Выбор направления исследования, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами решения проблемы моделирования с использованием двухслойного перцептона для анализа неисправностей асинхронных двигателей сельскохозяйственного оборудования, общее редактирование текста.

А. Д. Умурзакова. Обзор отечественных и зарубежных источников, вывод и адаптация расчетных формул, реализация исследования.

К. В. Хацевский. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, формулировка выводов, формулировка гипотезы о недостаточности существующих методик, выбор и корректировка направления исследования, общее редактирование текста.

Authors' contribution:

Lyubov A. Payuk. Setting the goal, research objectives and the scientific problem, formulating conclusions, formulating a hypothesis about the inadequacy of existing methods, choosing a research direction, general editing of the text.

Nataliya A. Voronina. Choosing the research direction, identifying the shortcomings of existing methods, comparing them with alternative approaches to solving the problem of modeling neural network algorithms for diagnosing asynchronous motors, general text editing.

Alexander V. Glazachev. Choosing the research direction, identifying the shortcomings of existing methods, comparing them with alternative approaches to solving the modeling problem using a two-layer perceptron for analysing faults in asynchronous motors used in agricultural equipment, general text editing.

Anara D. Umurzakova. Reviewing of domestic and foreign sources, derivation and adaptation of calculation formulas, research implementation.

Konstantin V. Khatsevskiy. Formulating the goal, research objectives and the scientific problem, formulating conclusions, formulating a hypothesis

about the inadequacy of existing methods, selecting and adjusting the research direction, general editing of the text.

Информация об авторах:

ПАЮК Любовь Анатольевна, кандидат технических наук, доцент отделения «Электроэнергетика и электротехника» Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ), г. Томск.

SPIN-код: 3333-1750

AuthorID (РИНЦ): 555556

AuthorID (SCOPUS): 57160434900

e-mail: pla@tpu.ru

ВОРОНИНА Наталья Алексеевна, кандидат технических наук, доцент отделения «Электроэнергетика и электротехника» ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 3176-9091

AuthorID (РИНЦ): 790645

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9327-6441>

AuthorID (SCOPUS): 57159363700

ResearcherID: I-9992-2018

e-mail: voronina@tpu.ru

ГЛАЗACHEв Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент отделения «Электроэнергетика и электротехника» ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 4516-6778

AuthorID (РИНЦ): 297842

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2174-6744>

AuthorID (SCOPUS): 57188629801

ResearcherID: E-6908-2017

e-mail: alexg@tpu.ru

УМУРЗАКОВА Анара Даукеновна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Эксплуатация электрооборудования» Казахского агротехнического исследовательского университета имени С. Сейфуллина, г. Астана.

SPIN-код: 8079-5187

AuthorID (РИНЦ): 834837

AuthorID (SCOPUS): 56485976200

e-mail: granat_72@mail.ru

ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 7219-6033

AuthorID (РИНЦ): 465857

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9504-1312>

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

e-mail: xkv-post@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.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 17.12.2025; одобрена после рецензирования 16.03.2026; принята к публикации 04.08.2026.

Information about the authors:

PAYUK Lyubov Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department,

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk.

SPIN-code: 3333-1750

AuthorID (RSCI): 555556

AuthorID (SCOPUS): 57160434900

e-mail: pla@tpu.ru

VORONINA Nataliya Alekseevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk.

SPIN-code: 3176-9091

AuthorID (RSCI): 790645

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9327-6441>

AuthorID (SCOPUS): 57159363700

ResearcherID: I-9992-2018

e-mail: voronina@tpu.ru

GLAZACHEV Alexander Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk.

SPIN-code: 4516-6778

AuthorID (RSCI): 297842

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2174-6744>

AuthorID (SCOPUS): 57188629801

ResearcherID: E-6908-2017

e-mail: alexg@tpu.ru

UMURZAKOVA Anara Daukenovna, Candidate of Technical Sciences, Head of the Electrical Equipment

Operation Department, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan.

SPIN-code: 8079-5187

AuthorID (RSCI): 834837

AuthorID (SCOPUS): 56485976200

e-mail: granat_72@mail.ru

KHATSEVSKIY Konstantin Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7219-6033

AuthorID (RSCI): 465857

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9504-1312>

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

e-mail: xkv-post@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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 17.12.2025; approved after reviewing 16.03.2026; accepted for publication 04.08.2026.

УДК/UDC 681.2.08:622.691.4:543.27

DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-106-116>

EDN: SVVHME

Научная статья/Original article

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСТРОЙСТВАМ ПОДГОТОВКИ ПРОБЫ СОРБЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ РОСЫ ПО ВОДЕ В ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

С. О. Михин^{1,2}✉, В. А. Ганжа², О. Н. Кошкур³¹Сахалинское линейное производственное управление магистральных трубопроводов

ООО «Газпром трансгаз Томск»,

Россия, 693012, г. Южно-Сахалинск, пр. Мира, 26/5

²Сибирский федеральный университет,

Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

³ООО «Завод высоковольтных электронных компонентов «Прогресс»,

Россия, 169336, г. Ухта, ул. Советская, 1

✉ serega_11rus@mail.ru

В статье рассмотрена задача формирования технических и эксплуатационных требований к устройству подготовки пробы сорбционно-емкостного преобразователя температуры точки росы по воде в природном газе. Показано, что исключение дополнительного методического смещения результата измерения температуры точки росы по воде требует сохранения влагосодержания и однофазного состояния пробы при ее отборе, дросселировании, транспортировании и подаче в измерительную камеру.

В исследовании был выполнен анализ существующих стационарных и мобильных систем отбора, фильтрации и кондиционирования пробы газа, а также пробоотборных устройств, размещаемых непосредственно в трубопроводе. Показано, что известные решения преимущественно обеспечивают фильтрацию, регулирование давления и расхода, удаление мешающих компонентов или представительный отбор из потока, но ограниченно решают задачу термостабилизации пробы после дросселирования. Отличительной особенностью рассматриваемого устройства подготовки пробы является совмещение в одном конструктивном узле функций отбора пробы из представительной зоны потока, дросселирования, защиты дросселирующих элементов и внутритрубной термостабилизации.

В статье рассмотрены требования к монтажной пластине, теплообменному гребню, теплообменным импульсным трубкам, дросселю, измерительной камере и материалам конструктивных элементов. Показано, что геометрия погружной части, площадь теплообменных поверхностей, длина термостабилизирующих трубок и теплофизические свойства материалов должны рассматриваться как взаимосвязанные параметры, определяющие сохранение однофазного состояния пробы и отсутствие дополнительного методического смещения результата измерения температуры точки росы по воде.

Ключевые слова: природный газ, температура точки росы по воде, влагосостояние газа, сорбционно-емкостной преобразователь, устройство подготовки пробы, представительная проба, пробоподготовка, термостабилизация пробы

Для цитирования: Михин С. О., Ганжа В. А., Кошкур О. Н. Технические и эксплуатационные требования к устройствам подготовки пробы сорбционно-емкостных преобразователей температуры точки росы по воде в природном газе. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 106–116. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-106-116>. EDN: SVVHME.

TECHNICAL AND OPERATIONAL REQUIREMENTS FOR SAMPLE CONDITIONING DEVICES OF SORPTION AND CAPACITANCE DEW POINT TEMPERATURE TRANSDUCERS FOR WATER IN NATURAL GAS

S. O. Mikhin^{1,2}✉, V. A. Ganzha², O. N. Koshkur³

¹Sakhalin Linear Production Department of Main Pipelines LLC "Gazprom Transgaz Tomsk",
Mira Ave., 26/5, Yuzhno-Sakhalinsk, 693012, Russia

²Siberian Federal University, Svobodny Ave., 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia

³High-Voltage Electronic Components Plant "Progress",
Sovetskaya St., 1, Ukhta, 169336, Russia

✉ serega_11rus@mail.ru

The article examines the development of technical and operational requirements for a sample preparation unit for a sorption-capacitive water dew point temperature transmitter in natural gas. The research shows that avoiding an additional methodological bias in water dew point temperature measurement requires preservation of the sample moisture content and single-phase state during sampling, throttling, transportation, and delivery to the measuring chamber.

The paper analyses existing stationary and mobile systems for gas sampling, filtration and sample conditioning, as well as probe-type devices installed directly into pipelines. The authors demonstrate that known solutions primarily provide filtration, pressure and flow rate regulation, removal of interfering components or representative sampling from the stream, but only partially address the problem of thermal stabilization of the sample after throttling. A distinctive feature of the under consideration is the integration of functions within a single structural assembly: extracting the sample from a representative zone of the flow, throttling, protecting the throttling elements and performing intra-pipe thermal stabilization.

The article outlines requirements for the mounting plate, heat exchange fin, impulse tubes with enhanced heat transfer, throttle valve, measuring chamber and construction materials. The authors show that the geometry of the immersion section, the surface area of heat exchangers, the length of the thermal stabilization tubes and the thermophysical properties of materials must be treated as interdependent parameters. These factors collectively determine the preservation of the sample's single-phase state and prevent any additional methodological bias in the water dew point temperature measurement results.

Keywords: natural gas, water dew point temperature, gas moisture state, sorption-capacitive transducer, sample preparation device, representative sample, sample preparation, sample thermal stabilization

For citation: Mikhin S. O., Ganzha V. A., Koshkur O. N. Technical and operational requirements for sample conditioning devices of sorption and capacitance dew point temperature transducers for water in natural gas. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):106–116. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-106-116>. EDN: SVVHME. (In Russ.).



© Mikhin S. O., Ganzha V. A., Koshkur O. N., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Топливо-энергетический комплекс Российской Федерации, включающий нефтяную, газовую, угольную и торфяную отрасли, электроэнергетику и теплоснабжение, является основой обеспечения энергетической и национальной безопасности нашего государства, укрепления его обороноспособности и внешнеэкономических связей, вносит значительный вклад в социально-экономическое развитие страны. Существенная доля в этом вкладе принадлежит предприятиям газотранспортной отрасли¹.

Документом «Генеральная схема развития газовой отрасли на период до 2035 года»² предусмотрено увеличение объемов добычи газа до 878 млрд куб. м и увеличение экспорта газа до 368,8 млрд куб. м. Интенсивное развитие газотранспортной системы напрямую связано с разработкой в ближайшей перспективе новых месторождений, строительством заводов и компрессорных станций, обеспечивающих бесперебойное компримирование и сжижение углеводородов, увеличением протяженности сети магистральных трубопроводов.

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. № 908-р.

² Генеральная схема развития газовой отрасли Российской Федерации на период до 2035 года. Одобрена решением Правительства Российской Федерации от 13 мая 2021 г.

Надежность и высокая эффективность работы газотранспортной системы Российской Федерации обеспечивается не только использованием высокотехнологичного современного оборудования, но и качеством транспортируемых углеводородов^{3,4} [1–3]. Значимой качественной характеристикой газа является его влажосостояние. С этой характеристикой связано понятие «температура точки росы по воде» ($ТТР_в$) — один из показателей влажности газа, характеризующий его кондиционность [2–4]. Нормативные значения $ТТР_в$ регламентируются положениями документа ТР ЕАС 046/2018 «О безопасности газа горючего природного, подготовленного к транспортированию и (или) использованию»⁵.

Широкое практическое применение в производственной деятельности компаний ПАО «Газпром», ПАО «Новатэк» и ООО «Сахалинская Энергия» для реализации мероприятий измерительного контроля $ТТР_в$ в природном газе получили измерители влажности конденсационного и сорбционного типов [2–7]. Техническими и метрологическими характеристиками этих приборов обеспечивается возможность их промышленного применения и измерения температуры точки росы по воде в широком диапазоне значений, включая область положительных и отрицательных температур транспортируемой среды⁶.

Более широкое применение, по сравнению с конденсационными, получили измерители влажности сорбционного типа, обеспечивающие непрерывность измерения, сравнительно малую инерционность, конструктивную простоту и возможность применения в широком диапазоне содержания водяных паров⁷ [2, 3, 8]. Такими приборами обеспечивается более широкий диапазон измерений $ТТР_в$ от +20 до –110 °С, и их конструкция непрерывно совершенствуется. Так, в работах [9, 10] приведено описание перспективной конструкции сорбционно-емкостного сенсора влажности, включающей алюминиевую основу (подложку), нанесенный на нее пористый влагочувствительный слой, поверх которого размещен пористый влагопроницаемый электрод. Описаны также особенности основных технологических этапов процесса изготовления этого изделия и представлены результаты его заводских испытаний.

В рабочем диапазоне $ТТР_в$ от +20 до –100 °С получены следующие значения основных электрических и метрологических показателей сенсора:

- электрическая ёмкость $C = 2061,60 \div 273$ пкФ;
- электрическое сопротивление $R = 1,53 \div 18,420$ МОм.

Значения относительного гистерезиса выходного электрического параметра сенсора — электрической емкости, составляют:

- при $ТТР_в$ от +20 до –10 °С — менее 5 %;

- при $ТТР_в$ от –20 до –60 °С — менее 1 %;
- при $ТТР_в$ от –70 до –100 °С — менее 0,5 %.

Полученные результаты свидетельствуют о пригодности новых сенсоров для применения в прецизионных измерителях влажности при решении практических задач газовой гигрометрии [8–10].

Метрологические характеристики чувствительного элемента определяют погрешность преобразователя только при подаче к нему представительной пробы. Изменение температуры, давления, фазового состояния или влажосодержания пробы при ее отборе и транспортировании создает дополнительное методическое смещение результата измерения $ТТР_в$. В настоящей работе влияние устройства подготовки пробы оценивается по условию сохранения однофазного состояния и неизменности влажосодержания пробы, а не посредством самостоятельного показателя достоверности устройства подготовки пробы (УПП) [7, 8, 11]. Измерение $ТТР_в$ в природном газе связано с необходимостью подачи к сенсору представительной пробы, состав, фазовое и температурное состояние которой не должны искажаться в процессе отбора, редуцирования, транспортирования и подачи в измерительную камеру [4, 7, 11]. Поэтому наряду с совершенствованием чувствительных элементов требуется формирование специальных условий пробоподготовки, включающих представительный отбор газа, снижение давления пробы, предотвращение сорбционных потерь и конденсации, защиту пробоотборного тракта от механических включений, стабилизацию расхода и температуры пробы перед ее контактом с чувствительным элементом [11, 12].

Особую значимость пробоподготовка приобретает при измерении $ТТР_в$ в магистральных газопроводах, где изменение давления и температуры газа может приводить к изменению влажосодержания насыщенного газа, конденсации воды, образованию газовых гидратов и соответствующему искажению состава отбираемой пробы [4, 13–18]. Следовательно, устройство подготовки пробы должно рассматриваться как функционально значимая часть измерительного преобразователя, обеспечивающая сохранение термодинамической представительности анализируемой пробы и достоверность последующего измерения $ТТР_в$.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является формирование и обоснование технических и эксплуатационных требований к устройству подготовки пробы сорбционно-емкостного преобразователя температуры точки росы по воде в природном газе с учетом условий отбора, дросселирования, термостабилизации и подачи представительной пробы к чувствительному элементу измерителя влажности.

³ СТО Газпром 089–2010. Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия. Введ. 25.10.2010. Москва: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. 19 с.

⁴ СТО Газпром 2-3.5-051–2006. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. Введ. 30.12.2005. Москва: Газпром ВНИИГАЗ, 2005. 205 с.

⁵ Технический регламент Евразийского экономического союза ТР ЕАЭС 046/2018 «О безопасности газа горючего природного, подготовленного к транспортированию и (или) использованию». Утвержден решением Совета Евразийской экономической комиссии от 14 сентября 2018 г. № 74.

⁶ ГОСТ Р 53763–2009. Газы горючие природные. Определение температуры точки росы по воде. Введ. 15.12.2009. Москва: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. 39 с.

⁷ Преобразователь температуры точки росы воды в искробезопасном исполнении Easidew PRO I.S. Руководство по монтажу, эксплуатации и техническому обслуживанию. Версия 1.1. Москва: Регуляр, 2012. 24 с.

Методический подход к формированию перечня технических и эксплуатационных требований основан на анализе условий эксплуатации УПП, функций его конструктивных элементов, особенностей дросселирования пробы, теплообмена между потоком транспортируемого газа и пробоотборным трактом, а также требований к сохранению однофазного состояния и термодинамической представительности пробы.

Результаты анализа известных систем отбора, фильтрации и кондиционирования пробы природного газа

В настоящее время для обеспечения работоспособности промышленных измерителей влажности применяются различные системы отбора, фильтрации и кондиционирования пробы газа. К ним относятся стационарные технологические системы пробоподготовки, выполняемые в виде панелей или шкафов с трубной обвязкой, фильтрами, регуляторами давления, расходомерами и средствами поддержания температурного режима. Например, система отбора проб Michell Instruments ES70 предусматривает варианты панельного или шкафного исполнения, гибкую конфигурацию фильтрации, регулирование давления и расхода, применение трубок и фитингов из нержавеющей стали, а также подключение к процессу через фитинги 6 мм или 1/4 дюйма. Такие системы предназначены для формирования стабильных условий подачи пробы к анализатору и обеспечения воспроизводимых результатов измерений⁸.

Отдельную группу составляют мобильные фильтрующие комплексы, предназначенные для предварительной очистки пробы от компонентов, мешающих измерению. Так, мобильный фильтрующий комплекс МФК–01 предназначен для фильтрации пробы газа от паров легких и тяжелых углеводородов, а также гликолей; при этом производителем указывается, что концентрация паров воды в пробе газа остается неизменной. Комплекс рекомендован для применения при измерении точки росы конденсационными гигрометрами в условиях присутствия в газе значительного количества углеводородов, конденсирующихся раньше воды⁹.

Кроме внешних систем фильтрации и кондиционирования, в измерительной практике применяются пробоотборные устройства, размещаемые непосредственно в трубопроводе. В ГОСТ 31370–2023 пробоотборный зонд определяется как приспособление, введенное в полость газопровода, аппарата или емкости для отбора представительной пробы природного газа¹⁰.

Такие устройства предназначены прежде всего для получения представительной пробы из потока и уменьшения влияния пристеночных зон, локаль-

ной неоднородности состава и гидродинамических возмущений [11].

В нормативной документации по отбору проб углеводородных сред также рассматриваются пробоотборные зонды щелевого типа, состоящие из стабилизатора и пробоотборной трубки; конструкция такого зонда может предусматривать одно или несколько отверстий для отбора пробы из потока¹¹.

Указанные решения выполняют важные функции отбора, подготовки и очистки пробы, однако по своей сущности решают преимущественно частные задачи пробоотборного тракта. Стационарные и мобильные системы обеспечивают фильтрацию, регулирование давления, регулирование расхода, удаление мешающих компонентов или стабилизацию условий подачи газа к анализатору, а трубчатые и щелевые пробоотборные зонды — представительный отбор пробы из потока. При этом задача сохранения термодинамической представительности пробы непосредственно в момент ее отбора из магистрального газопровода и после дросселирования решается ограниченно, поскольку в известных схемах проба, как правило, транспортируется по внешним линиям, в которых возможно изменение ее температуры, фазового состояния и времени отклика измерительной системы, что способствует снижению достоверности результатов измерения температуры точки росы по воде [7, 11].

Общее описание перспективной конструкции устройства подготовки пробы природного газа

Отличительной особенностью перспективного устройства подготовки пробы является совмещение в одном конструктивном узле функций отбора пробы из представительной зоны газового потока, дросселирования, защиты дросселирующих элементов от механических включений и термостабилизации отобранной пробы перед подачей в измерительную камеру сорбционно-емкостного преобразователя ТТР_в.

В отличие от внешних фильтрующих и кондиционирующих систем, а также от трубчатых и щелевых пробоотборных зондов, теплообменные элементы УПП размещаются в зоне потока транспортируемого газа и образуют с теплообменными импульсными трубками единую термодинамическую систему¹².

За счет этого теплота транспортируемого газа используется для компенсации температурного снижения отобранной пробы после ее редуцирования, что позволяет уменьшить вероятность достижения локальной температуры насыщения по воде, выпадения конденсата и образования гидратных или ледяных отложений на элементах пробоотборного тракта [13, 16–18].

⁸ Michell Instruments. ES70 Sampling System. User's Manual. URL: <https://www.processsensing.com/docs/manual/ES70%2097506%20Manual.pdf>. (дата обращения: 16.06.2026).

⁹ Мобильный фильтрующий комплекс МФК-01. НПО «Вымпел». URL: <https://vymfel.group/products/gas-analyzers/mobilnyy-filtruyushchiy-kompleks-mfk-01/> (дата обращения: 16.06.2026).

¹⁰ ГОСТ 31370–2023. Газ природный. Руководство по отбору проб. Введ. 01.01.2025. Москва: Институт стандартизации, 2023. 66 с.

¹¹ ГОСТ Р 55609–2013. Отбор проб газового конденсата, сжиженного углеводородного газа и широкой фракции легких углеводородов. Общие требования. Введ. 01.07.2015. Москва: Стандартинформ, 2014. 36 с.

¹² Пат. 195209 U1 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/22. Устройство отбора пробы газа проточное нормализующее / Копчиков А. Е., Михин С. О., Киборт И. Д. № 2018142152; заявл. 29.11.2018; опубл. 17.01.2020. EDN: KLJWNP.

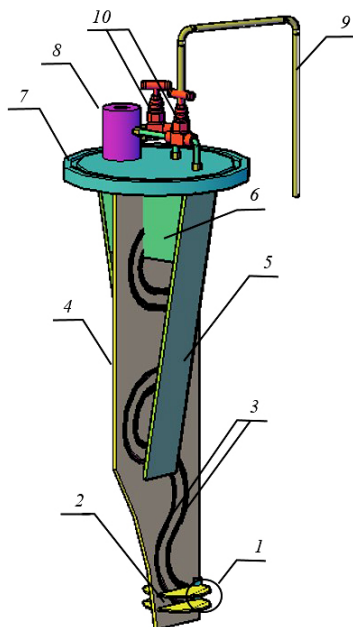


Рис. 1. Концептуальное изображение устройства подготовки пробы преобразователя сорбционно-емкостного температуры точки росы по воде в природном газе:

- 1 — место установки дросселей;
- 2 — противообледенительные ребра; 3 — теплообменные импульсные трубки;
- 4 — теплообменный гребень;
- 5, 6 — ребра жесткости;
- 7 — монтажная пластина;
- 8 — измерительная камера;
- 9 — сбросная трубка;
- 10 — игольчатые вентили

Fig. 1. Conceptual representation of the sorption and capacitive water dew point temperature converter for natural gas:

- 1 — location of throttle installation;
- 2 — anti-icing fins;
- 3 — heat exchange pulse tubes;
- 4 — heat exchange comb;
- 5, 6 — stiffeners; 7 — mounting plate;
- 8 — measuring chamber;
- 9 — discharge tube;
- 10 — needle valves

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Результаты современных исследований показывают, что фазовое состояние водяных паров и вероятность гидратообразования в природном газе существенно зависят от сочетания давления, температуры, состава газа и характера теплообмена [4, 13–18]. Требования к материалам и конфигурации пробоотборного тракта также должны учитывать возможность сорбции определяемых компонентов и изменения состава пробы при ее транспортировании [7, 11].

Научная новизна работы состоит в формулировке критерия сохранения термодинамической представительности редуцированной пробы и в представлении устройства подготовки пробы как единой сопряженной тепло-гидродинамической системы. Критерий выполняется при следующих условиях: во всех сечениях пробоотборного тракта температура пробы превышает локальную температуру точки росы по воде при соответствующих значениях дав-

ления и компонентном составе газа не менее чем на заданный температурный запас.

В отличие от поэлементного задания параметров предложенный подход связывает пространственное положение дросселирующих элементов, площадь теплообменных поверхностей, длину и диаметр импульсных трубок, а также теплофизические свойства материалов.

Новым результатом является расчетный принцип формирования требований к УПП по условию недопущения фазового перехода и изменения влагосодержания пробы.

Таким образом, подготовка пробы к контролю должна обеспечивать ее отбор из представительной зоны газового потока, дросселирование с последующей подачей через теплообменные импульсные трубки в измерительную камеру, выравнивание температуры пробы, изменившейся при дросселировании, до значений температуры транспортируемого по трубопроводу газа, а также физическую защиту дросселирующих устройств от воздействия механических частиц, содержащихся в потоке.

Выполнение перечисленных выше функций обеспечивается конструкцией УПП, концептуальное изображение которого представлено на рис. 1.

Конструкция УПП включает монтажную пластину 7, теплообменный гребень 4, ребра жесткости 5 и 6, противообледенительные ребра 2 с установленными на них в зоне 1 дросселями, теплообменные импульсные трубки 3, измерительную камеру 8, игольчатые вентили 10 и сбросную трубку 9. Конструктивные элементы УПП, расположенные ниже монтажной пластины 7, относятся к погружной части устройства. Монтажная пластина 7 и конструктивные элементы УПП, расположенные на ней, относятся к наружной части устройства. Проба газа отбирается из транспортируемого по трубе потока через дроссели, расположенные на противообледенительных ребрах 2, и перемещается по импульсным теплообменным трубкам 3 в измерительную камеру 8 за счет разности значений давления внутри трубы и атмосферного давления.

По мере прохождения отобранной пробы по трубкам 3 происходит восстановление ее температуры, изменившейся при дросселировании, до значений температуры транспортируемой по газопроводу среды за счет теплообмена между этой средой и материалами, из которых выполнены теплообменный гребень 4 и закрепленные на нем теплообменные импульсные трубки 3. Условием сохранения однофазного состояния отбираемой пробы является превышение ее локальной температуры над температурой точки росы по воде при соответствующих локальном давлении и компонентном составе газа:

$$T_{\text{пр}}(x) > T_{\text{трв}}(P, (x)y), \quad (1)$$

где $T_{\text{пр}}(x)$ — локальная температура пробы в рассматриваемом сечении пробоотборного тракта; $T_{\text{трв}}$ — температура точки росы по воде; $P(x)$ — локальное давление пробы; y — компонентный состав газа. При проектировании УПП указанное условие должно выполняться с заданным температурным запасом $\Delta T_{\text{зап}}$:

$$T_{\text{пр}}(x) \geq T_{\text{трв}}(P, (x)y) + \Delta T_{\text{зап}}. \quad (2)$$

Выполнение данного условия предотвращает конденсацию водяных паров в пробоотборном

Таблица 1. Основные физические характеристики перекачиваемой среды
Table 1. Basic physical features of the pumped medium

Показатель	Значение
Давление рабочее, не более, МПа	12,0
Температура потока газа, °С	– 5 ... + 40
Скорость потока газа, не более, м/с	20,0
Фазовое состояние измеряемой среды	Однофазная газовая среда

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Таблица 2. Основные физические характеристики отбираемой пробы
Table 2. Main physical features of the collected sample

Показатель	Значение
Давление газа перед дросселирующим устройством, не более, МПа	12,0
Рабочее давление пробы после дросселирования, не более, МПа	0,15
Расчетное давление измерительной камеры, МПа	12,0
Температура пробы, °С	– 20 ... + 40
Степень фильтрации	До 5,0 мкм
Номинальный расход пробы, л/ч	3–5
Предельная пропускная способность пробоотборного тракта, л/ч	не менее 50

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

тракте и обеспечивает сохранение влажностного содержания пробы перед ее поступлением к чувствительному элементу.

Минимальное значение разности (2) по всей длине пробоотборного тракта принимается количественным критерием пригодности выбранной конструкции УПП. Критерий считается выполненным, если указанная разность остается положительной и не меньше заданного температурного запаса $\Delta T_{\text{зап}}$.

Конструкцией измерительной камеры 8 обеспечивается установка и фиксация измерителя влажности, внутри корпуса которого размещен сорбционно-емкостной сенсор влажности, омываемый поступающей во внутреннюю полость измерительной камеры 8 нормализованной пробой газа. Отработавшая проба газа через трубку 9 сбрасывается в свечную обвязку.

Для защиты дросселей от механических частиц в конструкции УПП предусмотрены специальные пластины, отводящие поток транспортируемого газа вместе с механическими включениями в сторону от точки отбора пробы.

Технические и эксплуатационные требования к основным конструктивным элементам устройства подготовки пробы

В преддверии работ по проектированию конструкции УПП следует сформировать перечень технических и эксплуатационных требований, которым должны соответствовать конструктивные элементы устройства и изделие в целом. Данный перечень следует формировать с учетом условий работы УПП: давление, температура, скорость потока перекачиваемой среды (табл. 1), ее состав, химическая агрессивность (наличие сероводородов, углекислого газа), наличие коррозионно-активных и конденсирующихся компонентов, расход и возможность образования жидкой или твердой фазы [11, 18]. Также следует учесть и нормируемые физические характеристики пробы газа, отбираемой из потока через

УПП и обеспечиваемой его конструкцией: давление пробы, ее температура, степень фильтрации, расчетный расход анализируемого газа при отборе через дроссель с соответствующим диаметром проходного отверстия (табл. 2).

Основным несущим элементом конструкции УПП является монтажная пластина 7, воспринимающая силовое воздействие от закрепленного на ней снизу теплообменного гребня 4, усиленного ребрами жесткости 5 и 6. Силовое воздействие потока на погружную часть УПП определяется выражением:

$$F_d = C_d \rho g^2 \frac{A_{\text{пр}}}{2}, \quad (3)$$

где C_d — коэффициент гидродинамического сопротивления, ρ — расчетная плотность газа, g — скорость потока, $A_{\text{пр}}$ — площадь проекции погружной части на плоскость, перпендикулярную потоку.

При максимальной скорости газа 20 м/с, консервативной площади проекции 0,1365 м², расчетной плотности газа 100 кг/м³ и $C_d = 1,2$ верхняя оценка силы составляет около 3,3 кН, а изгибающего момента относительно монтажной пластины при расчетном плече приложения силы 0,35 м — около 1,15 кН·м. Поэтому прочность монтажной пластины, ребер жесткости и сварных соединений должна проверяться при нагрузках не ниже указанных расчетных значений.

Следовательно, материал для изготовления этих элементов, а также и противообледенительных ребер 2, должен обладать высокой конструктивной прочностью, способностью противостоять коррозионному и химическому воздействию перекачиваемой среды, допускать возможность взаимного соединения деталей сваркой, а также (для монтажной пластины 7) механическую обработку резанием.

Конструкцией монтажной пластины 7 (рис. 2), несущей элементы погружной и наружной частей УПП, обеспечивается установка этого устройства в трубопровод на фланце с номинальным размером

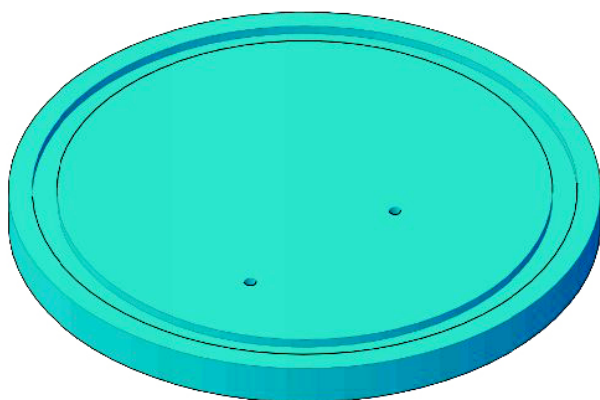


Рис. 2. Концептуальное изображение монтажной пластины устройства подготовки пробы природного газа
Fig. 2. Conceptual illustration of the mounting plate of the natural gas sample preparation device
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

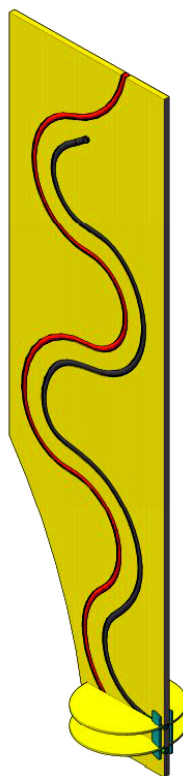


Рис. 3. Концептуальное изображение теплообменного гребня, теплообменных импульсных линий и противообледенительных ребер устройства подготовки пробы
Fig. 3. Conceptual illustration of the heat exchange ridge, heat exchange impulse lines and anti-icing fins of the sample preparation unit

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

DN 200. Наружный диаметр монтажной пластины 7 для работы в составе фланцевого соединения типа «шип — паз» с указанным значением номинального размера должен составлять 284 мм. Толщина пластины должна быть достаточной для выполнения пазов под шип фланца при одновременном сохранении механической прочности изделия.

Габаритная высота погружной части УПП определяется вертикальным размером теплообменного гребня 4 (рис. 3) и находится в зависимости от значений номинального размера трубопровода. При этом размеры гребня, а следовательно, и площадь его наружных поверхностей (поверхностей теплообмена в составе термодинамической системы «теплообменный гребень-теплообменные импульсные трубки»), должна быть достаточной для своевременного выравнивания температуры пробы, изменившейся при дросселировании, до значений температуры транспортируемой по газопроводу среды.

Геометрическими размерами противообледенительных ребер 2 (рис. 3) (площадью их поверхностей теплообмена) должно обеспечиваться поступление тепловой энергии в область отбора пробы в количестве, достаточном для поддержания значений температуры контролируемой среды на уровне, превышающем значения температуры точки росы, чем сводится к минимуму возможность обледенения дросселирующих устройств.

Теплообменные импульсные трубки 3 (рис. 3) снаружи омываются потоком транспортируемого по трубопроводу газа, изнутри — потоком отбираемой пробы. Следовательно, материал для их изготовления должен обладать способностью противостоять коррозионному и химическому воздействию перекачиваемой среды, допускать возможность соединения с материалом теплообменного гребня 4 сваркой для создания единой термодинамической системы, а также механическую обработку резанием.

Длина теплообменной импульсной трубки 3 должна обеспечивать как соединение дросселя с измерительной камерой 8, так и восстановление температуры редуцированной пробы. Для реализованного исполнения линии отбора применяется трубка наружным диаметром 6 мм, внутренним диаметром 4 мм и развернутой длиной не менее 1094 мм; предельная длина по техническим условиям составляет 1400 мм. При длине 1094 мм площадь наружной теплообменной поверхности трубки составляет не менее 0,0206 м², а ее внутренний объем — около 13,75 см³. При номинальном расходе пробы 3–5 л/ч расчетное время пребывания газа в трубке составляет приблизительно 9,9–16,5 с. Длина и площадь теплообменной поверхности считаются достаточными при выполнении на выходе трубки условия

$$T_{\text{пр.вых}} \geq T_{\text{трв}} (P_{\text{вых}}' y) + \Delta T_{\text{зап}}'$$

Окончательный выбор длины должен подтверждаться совместным решением уравнений движения и теплового баланса либо экспериментальным изменением температуры пробы на выходе [16, 18, 19].

Дроссель предназначен для снижения давления отбираемого из трубопровода газа за счет его прохождения через отверстие малого диаметра в местном сужении проходного канала и последующей подачи пробы по теплообменным импульсным трубкам 3 в измерительную камеру 8. Расход пробы газа, проходящей через дроссель, должен составлять 3–5 л/час, перепад давления — от 12 до 0,15 МПа, диаметр проходного отверстия $d_0 = 0,1–0,5$ мм с учетом давления газа в точке отбора, давления на выходе пробоотборной линии и требуемого расхода анализируемой пробы.

Особенностью работы дросселя является возможность реализации критического режима истечения газа. При достаточно большом отношении давлений до и после дросселя в его минимальном

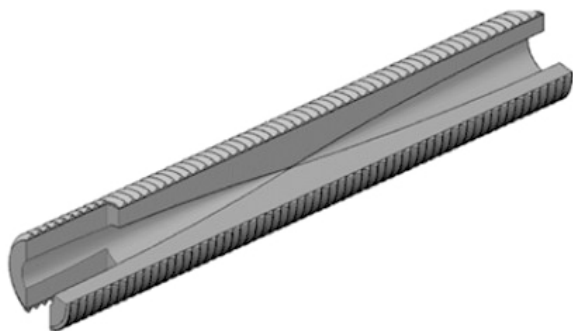


Рис. 4. Концептуальное изображение дросселя устройства подготовки пробы природного газа
Fig. 4. Conceptual illustration of a natural gas sample preparation device choke

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

проходном сечении может устанавливаться критический режим истечения, соответствующий достижению числом Маха значения, близкого к единице. В таком режиме массовый расход определяется преимущественно параметрами газа перед дросселем, его теплофизическими свойствами, эффективной площадью проходного сечения и коэффициентом расхода [20].

Требования к материалу для изготовления дросселя аналогичны требованиям, предъявляемым к другим элементам погружной части УПП: материал должен обладать способностью противостоять коррозионному и химическому воздействию перекачиваемой среды, допускать механическую обработку резанием.

Конструктивно дроссель может быть выполнен в соответствии с описанием, изложенным в охранном документе¹³ (рис. 4). В рассматриваемом исполнении УПП давление в точке отбора может составлять до 12 МПа, а давление в точке соединения с открытой сбросной линией — не более 0,15 МПа; следовательно, расчетный перепад давления на дросселирующем устройстве может достигать порядка 11,85 МПа. При расчетном режиме $P_y = 8$ МПа дроссель с диаметром проходного отверстия $d_0 = 0,1$ мм обеспечивает расход анализируемого газа около 3,5 л/ч.

Материал корпуса измерительной камеры 8 должен обладать способностью противостоять коррозионному и химическому воздействию перекачиваемой среды, коррозионному воздействию атмосферной влаги, допускать возможность соединения с материалом монтажной пластины 7 и теплообменных импульсных трубок 3 сваркой, а также механическую обработку резанием.

Диаметр внутренней полости измерительной камеры следует выбирать с учетом наружного диаметра защитного пенала чувствительного элемента, присоединительных размеров корпуса преобразователя влажности и обеспечения возможности свободного омыwania сенсора потоком подготовленной пробы газа.

Глубина внутренней полости измерительной камеры должна определяться высотой чувствительно-

го элемента с защитным пеналом и размерами присоединительного узла преобразователя влажности.

Внутренний объем измерительной камеры должен быть минимально необходимым для размещения чувствительного элемента и свободного омыwania его поверхности, что позволяет уменьшить время обновления пробы и инерционность измерительной системы [11].

Не допускается контакт защитного пенала с запорной арматурой.

Толщина стенки измерительной камеры должна обеспечивать ее конструктивную прочность при расчетном давлении 12 МПа. Указанное значение принимается равным максимальному давлению газа перед дросселирующим устройством с учетом возможности аварийного воздействия полного давления газопровода при повреждении, разрушении или потере герметичности дросселирующего элемента. В штатном режиме рабочее давление пробы после дросселирования и в измерительной камере не должно превышать 0,15 МПа (табл. 2).

Требования к теплофизическим характеристикам материалов конструктивных элементов устройства подготовки пробы

При формировании требований к материалам конструктивных элементов устройства подготовки пробы необходимо учитывать не только их прочностные и противокоррозионные характеристики, но и теплофизические свойства, определяющие способность конструкции эффективно восстанавливать температуру пробы газа, изменившуюся при дросселировании. К таким свойствам относятся: коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность и коэффициент линейного температурного расширения. Практика разработки, создания и эксплуатации таких устройств свидетельствует о целесообразности использования для изготовления конструктивных элементов погружной части УПП некоторых марок коррозионностойких сталей со следующими теплофизическими характеристиками:

- плотность $\rho = 7920 - 8000$ кг/м³;
- коэффициент теплопроводности $\lambda \approx 15 - 16$ Вт/(м·К);
- удельная теплоемкость $c \approx 500 - 725$ Дж/(кг·К);
- коэффициент линейного расширения (при 100 °С) $\alpha_t \approx 16,6 \cdot 10^{-6}$ 1/К.

Указанные параметры должны учитываться при обосновании площади теплообменной поверхности гребня, длины термостабилизирующих трубок и геометрической формы и размеров противообледенительных ребер, поскольку именно они определяют интенсивность подвода теплоты к зоне дросселирования и восстановления температуры редуцированной пробы перед измерением температуры точки росы природного газа по воде измерителями влажности.

Для изготовления погружной части УПП целесообразно применять коррозионностойкие стали, выбор конкретной марки которых должен выполняться с учетом механической прочности, свариваемости, коррозионной стойкости, коэффициента теплопроводности, теплоемкости, плотности

¹³ Пат. 191315 U1 Российская Федерация, МПК В 05 В 1/00. Сверхзвуковой редуцирующий дроссель / Копчиков А. Е., Михин С. О., Киборт И. Д. № 2018142156; заявл. 29.11.2018; опубл. 01.08.2019. EDN: HEKXJC.

и коэффициента линейного температурного расширения.

Для утепления наружной части УПП при его эксплуатации в условиях низких температур следует предусмотреть возможность использования противообледенительного кожуха, выполненного из термоизоляционного материала.

Заключение

Сказанное выше свидетельствует о том, что при проектировании и создании УПП в качестве обязательных требований к материалам теплообменных и проточных элементов погружной части и измерительной камеры устройства следует принимать коррозионную и химическую стойкость в среде природного газа, механическую прочность, технологические свойства (свариваемость, возможность механической обработки резанием), а также теплофизические характеристики — коэффициент теплопроводности, теплоемкость, плотность материала и коэффициент его линейного температурного расширения. Геометрические размеры и форма этих конструктивных элементов должны быть тщательно обоснованы.

Соблюдение указанных технических и эксплуатационных требований обеспечивает долговечность, сохраняемость, безотказность УПП и его продолжительный рабочий ресурс. Выполнение сформированных требований направлено на уменьшение изменений температуры, давления, состава и фазового состояния пробы при ее отборе и транспортировании и тем самым снижает риск возникновения дополнительного методического смещения результата измерения TTP_B [4, 7, 8, 11].

Список источников / References

1. Изотов Н. И. Требования к качеству СПГ за рубежом // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 5 (41). С. 20–35. EDN: SNAXEV.

Izotov N. I. Trebovaniya k kachestvu SPG za rubezhom. *Transport na Alternativnom Toplivo*. 2014;5(41):20–35. EDN: SNAXEV. (In Russ.).

2. Макинский А. А., Донских Б. Д., Максимова Т. В. [и др.]. Сорбционные методы для определения содержания водяных паров в природном газе: состояние дел и перспективы развития // Газовая промышленность. 2023. № S4 (857). С. 110–120. EDN: QWTIOG.

Makinsky A. A., Donskikh B. D., Maximova T. V. [et al.]. Sorption methods for water vapor content determination in natural gas. Current situation and development prospects. *Gazovaya promyshlennost'*. 2023;S4(857):110–120. EDN: QWTIOG. (In Russ.).

3. Qorşkov A. V., Valiyev R. Q. Təbii qazın axındakı rütubətinin ölçülməsinin müasir üsulları və vasitələri // Azərbaycan neft təsərrüfatı. 2023. № 11. S. 31–38. <https://doi.org/10.37474/0365-8554/2023-11-31-38>. EDN: WGIQYF.

Gorshkov A. V., Valiyev R. K. Modern methods and means for online measurement of moisture content in natural gas. *Azerbaijan Oil Industry*. 2023;11:31–38. <https://doi.org/10.37474/0365-8554/2023-11-31-38>. EDN: WGIQYF. (In Azer.).

4. Паранук А. А., Дунаев В. И., Приходько М. Г. Об одной методике определения влагосодержания природного газа в трубопроводных системах // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2024. Т. 10, № 3 (39). С. 24–36. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-3-24-36>. EDN: LLJWPD.

Paranuk A. A., Dunaev V. I., Prikhodko M. G. A method for determining the moisture content of natural gas in

pipeline systems. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*. 2024;10(3):24–36. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-3-24-36>. EDN: LLJWPD. (In Russ.).

5. Хаджийская Е. Ю. Разработка электронных блоков анализатора влажности природного газа // Вестник НовГУ. 2023. № 1 (130). С. 146–157. [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2023.1\(130\).146-157](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2023.1(130).146-157). EDN: NXBCJQ.

Khadzhiyskaya E. Yu. Development of electronic units of the natural gas humidity analyzer. *Vestnik NovSU*. 2023;1(130):146–157. [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2023.1\(130\).146-157](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2023.1(130).146-157). EDN: NXBCJQ. (In Russ.).

6. Хаджийская Е. Ю., Покровская М. В. Разработка метода анализа данных в TDLAS-газоанализаторе // Вестник НовГУ. 2025. № 3 (141). С. 455–467. [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2025.3\(141\).455-467](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2025.3(141).455-467). EDN: CLGMTF.

Khadzhiyskaya E. Yu., Pokrovskaya M. V. Development of a data analysis method in a TDLAS gas analyzer. *Vestnik NovSU*. 2025;3(141):455–467. [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2025.3\(141\).455-467](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2025.3(141).455-467). EDN: CLGMTF. (In Russ.).

7. Takeda N., Carroll P., Tsukahara Y. [et al.]. Trace moisture measurement in natural gas mixtures with a single calibration for nitrogen background gas. *Measurement Science and Technology*. 2020;31(10):104007. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab94ff>. EDN: DZDGBR.

8. Михин С. О. Разработка сорбционно-емкостного прибора контроля влагосостояния природного газа: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2025. 205 с.

Mikhin S. O. Razrabotka sorbtionno-emkostnogo pribora kontrolya vlagosostoyaniya prirodnogo gaza. Krasnoyarsk, 2025. 205 p. (In Russ.).

9. Михин С. О., Егоров Д. Н., Кошкур О. Н., Романов А. Е. Топология изготовления сорбционно-емкостного сенсора влажности на основе тонких пленок, полученных микродуговым оксидированием и магнетронным напылением // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 10. С. 38–48. <https://doi.org/10.14489/td.2023.10.pp.038-048>. EDN: PMVZFS.

Mikhin S. O., Egorov D. N., Koshkur O. N., Romanov A. E. Topology of manufacturing a sorption-capacitive humidity sensor based on thin films obtained by microarc oxidation and magnetron sputtering. *Kontrol'. Diagnostika*. 2023;26(10):38–48. <https://doi.org/10.14489/td.2023.10.pp.038-048>. EDN: PMVZFS. (In Russ.).

10. Михин С. О., Ганжа В. А., Кошкур О. Н., Романов А. Е. Тонкопленочный сорбционно-емкостной сенсор контроля влагосостояния газовых сред // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 9. С. 56–62. <https://doi.org/10.14489/td.2025.09.pp.056-062>. EDN: LUJOHT.

Mikhin S. O., Ganzha V. A., Koshkur O. N., Romanov A. E. Thin-film sorption-capacitive sensor for monitoring the moisture content of gaseous media. *Kontrol'. Diagnostika*. 2025;28(9):56–62. <https://doi.org/10.14489/td.2025.09.pp.056-062>. EDN: LUJOHT. (In Russ.).

11. Arrhenius K., Francini L., Beker O. Sampling methods for renewable gases and related gases: challenges and current limitations. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2022;414(21):6285–6294. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-03949-0>.

12. Ильющенко А. Ф., Кусин Р. А., Черняк И. Н. [и др.]. Выбор метода изготовления пористых порошковых изделий фильтрующего назначения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 10 (739). С. 24–34. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-24-34>. EDN: OCMVDU.

Ilyushchanka A. Ph., Kusin R. A., Charniak I. M. [et al.]. Selecting a method for the manufacture of porous powder filter products. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021;10(739):24–34. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-24-34>. EDN: OCMVDU. (In Russ.).

13. Квон В. Г., Истомин В. А., Крапивин В. Б. [и др.]. Особенности отложения и накопления гидратов в скважинах Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторож-

дения // Вести газовой науки. 2023. № 2 (54). С. 148–155. EDN: SOFBNY.

Kvon V. G., Istomin V. A., Krapivin V. B. [et al.]. Features of hydrates deposition and accumulation in wellbores of Chayandinskoye oil and gas condensate field. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2023;2(54):148–155. EDN: SOFBNY. (In Russ.).

14. Истомин В. А., Федулов Д. М., Сергеева Д. В. [и др.]. Гидратообразование при добыче газа на Чаиндинском нефтегазоконденсатном месторождении. Часть 1. Призабойная зона пласта // Газовая промышленность. 2022. № 2 (828). С. 46–53. EDN: VYXAXD.

Istomin V. A., Fedulov D. M., Sergeeva D. V. [et al.]. Hydrate formation in gas production at Chayandinskoye oil, gas and condensate field. Part 1. Bottom hole formation zone. *Gazovaya Promyshlennost'*. 2022;2(828):46–53. EDN: VYXAXD. (In Russ.).

15. Истомин В. А., Крапивин В. Б., Тройникова А. А. [и др.]. Гидратообразование при добыче газа на Чаиндинском нефтегазоконденсатном месторождении. Часть 2. Газоконденсатные скважины // Газовая промышленность. 2022. № 3 (830). С. 42–48. EDN: DGYFOK.

Istomin V. A., Krapivin V. B., Troynikova A. A. [et al.]. Hydrate formation in gas production at Chayandinskoye oil, gas and condensate field. Part 2. Gas condensate wells. *Gazovaya Promyshlennost'*. 2022;3(830):42–48. EDN: DGYFOK. (In Russ.).

16. Паранук А. А., Буныкин А. В., Шиян С. И. Разработка математической модели расчета образования гидратов в трубопроводе с учетом изменения температуры // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 4. С. 107–114. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-4-107-114>. EDN: KOJSPZ.

Paranuk A. A., Bunyakin A. V., Shiyen S. I. Development of a mathematical model for calculating hydrate formation in a pipeline taking into account temperature change. *Petroleum Engineering*. 2021;19(4):107–114. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-4-107-114>. EDN: KOJSPZ. (In Russ.).

17. Салихов Р. М., Чертовских Е. О., Гильмутдинов Б. Р. [и др.]. Повышение эффективности мероприятий по предупреждению гидратообразования на Ярактинском нефтегазоконденсатном месторождении // Нефтяное хозяйство. 2020. № 9. С. 50–54. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-9-50-54>. EDN: NTTXOA.

Salikhov R. M., Chertovskih E. O., Gilmudinov B. R. [et al.]. Improving the efficiency of measures to prevent hydrate formation at the Yaraktinskoye oil-gas-condensate field. *Neftyanoye Khozyaystvo*. 2020;9:50–54. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-9-50-54>. EDN: NTTXOA. (In Russ.).

18. Истомин В. А., Измченко Д. В., Сергеева Д. В. [и др.]. Анализ термобарических режимов работы эксплуатационных скважин Чаиндинского НГКМ // Наука и техника в газовой промышленности. 2022. Т. 90, № 2. С. 39–48. EDN: WPRZDV.

Istomin V. A., Izmchenko D. V., Sergeyeva D. V. [et al.]. Analiz termobaricheskikh rezhimov raboty ekspluatatsionnykh skvazhin Chayandinskogo NGKM. *Science & Technology in the Gas Industry*. 2022;90(2):39–48. EDN: WPRZDV. (In Russ.).

19. Паранук А. А., Дунаев В. И. Математическое моделирование тепловых потерь для промысловых систем сбора природного газа // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2025. Т. 11, № 3 (43). С. 6–17. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-3-6-17>. EDN: VOJGRY.

Paranuk A. A., Dunaev V. I. Mathematical modeling of heat losses for field natural gas gathering systems. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*. 2025;11(3):6–17. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-3-6-17>. EDN: VOJGRY. (In Russ.).

20. Gimon T. A., Zvegintsev V. I., Fedorova N. N. Study of the transient gas outflow from a container. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2023;30:857–863. <https://doi.org/10.1134/S0869864323050050>.

Вклад авторов:

С. О. Михин. Постановка цели и задач исследования, анализ современного состояния вопроса, проведение анализа известных систем отбора, фильтрации и кондиционирования проб природного газа, оценка преимуществ и недостатков известных технических решений в данной области, формирование первичного перечня технических и эксплуатационных требований к устройствам подготовки пробы природного газа, формулирование выводов.

В. А. Ганжа. Проведение обзора литературно-патентных источников в рамках анализа современного состояния вопроса, конкретизация цели и задач работы, корректировка перечня технических и эксплуатационных требований к устройствам подготовки пробы природного газа, требований к теплофизическим характеристикам материалов конструктивных элементов устройства подготовки пробы, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

О. Н. Кошкур. Корректировка технических и эксплуатационных требований к устройствам подготовки пробы природного газа, требований к теплофизическим характеристикам материалов конструктивных элементов устройства подготовки пробы с учетом конструкторско-технологических аспектов, формулирование выводов.

Authors' contribution:

Sergey O. Mikhin. Setting research goal and objectives, analysing the current state and existing systems for collecting, filtering and conditioning natural gas samples, assessing the advantages and disadvantages of existing technical solutions, developing a preliminary list of technical and operational requirements for natural gas sample preparation devices, formulating conclusions.

Vladimir A. Ganzha. Conducting a review of literature and patent sources as part of an analysis of the current state of the issue, specifying the goal and objectives of the work, adjusting the list of technical and operational requirements for natural gas sample preparation devices, requirements for the thermophysical features of the materials of the sample preparation device structural elements, formulating conclusions, preparing the text of the article.

Oleg N. Koshkur. Adjustment of technical and operational requirements for natural gas sample preparation devices, requirements for the thermophysical features of materials for sample preparation device structural elements considering design and technological aspects, formulation of conclusions.

Информация об авторах:

МИХИН Сергей Олегович, кандидат технических наук, заместитель начальника участка контрольно-измерительных приборов и автоматики Сахалинского линейного производственного управления магистральных трубопроводов ООО «Газпром трансгаз Томск», г. Южно-Сахалинск; докторант Сибирского федерального университета, г. Красноярск.

SPIN-код: 7190-5289

AuthorID (РИНЦ): 1288359

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6518-277X>

e-mail: serega_11rus@mail.ru

ГАНЖА Владимир Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Топливообеспечение и горюче-смазочные материалы»

Сибирского федерального университета, г. Красноярск.

SPIN-код: 8438-4763

AuthorID (РИНЦ): 655237

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0647-8502>

e-mail: vladimirganzha@yandex.ru

КОШКУР Олег Николаевич, генеральный директор ООО «Завод высоковольтных электронных компонентов «Прогресс», г. Ухта.

AuthorID (РИНЦ): 506193

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6583-5043>

e-mail: zvekpost@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.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 24.07.2026; одобрена после рецензирования 11.09.2026; принята к публикации 16.09.2026.

Information about the authors:

MIKHIN Sergey Olegovich, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Instrumentation and Automation Section, Sakhalin Linear Production Department of Main Pipelines, LLC "Gazprom Transgaz

Tomsk", Yuzhno-Sakhalinsk; Doctoral Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

SPIN-code: 7190-5289

AuthorID (RSCI): 1288359

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6518-277X>

e-mail: serega_11rus@mail.ru

GANZHA Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Fuel Supply and Lubricants Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk.

SPIN-code: 8438-4763

AuthorID (RSCI): 655237

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0647-8502>

e-mail: vladimirganzha@yandex.ru

KOSHKUR Oleg Nikolaevich, General Director, High-Voltage Electronic Components Plant "Progress", Ukhta.

AuthorID (RSCI): 506193

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6583-5043>

e-mail: zvekpost@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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 24.07.2026; approved after reviewing 11.09.2026; accepted for publication 16.09.2026.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕЧИ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

В. А. Дмитриев¹✉, С. А. Милушенко¹, К. В. Беляев²

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5

²Омский автобронетанковый инженерный институт,
Россия, 644098, г. Омск, 14-й Военный городок, 119

✉ vitaliy.dmitriyev.02@bk.ru

Повышение эффективности и качества автоматического управления трубчатыми печами является приоритетной задачей для современных нефтеперерабатывающих предприятий. В данной работе представлена математическая модель печи установки первичной переработки нефти, предназначенная для стабилизации температуры нефти перед её разделением на фракции. Объектом исследования выступает двухскатная трубчатая печь шатрового типа установки первичной переработки нефти с контуром регулирования температуры нефтепродукта на выходе из змеевика по расходу топливного газа.

Моделирование базируется на синтезе передаточных функций элементов системы: датчик температуры представлен апериодическим звеном первого порядка, исполнительный механизм — интегрирующим звеном, регулирующий клапан — апериодическим звеном, объект управления — апериодическим звеном. Особенностью предложенного подхода является комплексный учёт физико-химических факторов: переменной теплотворной способности топливного газа, вычисляемой через показатель Воббе; аккумулирующей способности стенок жаровых труб; зависимости теплоёмкости нефти от её влагосодержания.

Имитационная модель реализована в среде SimInTech; исследование выполнено методом вычислительного эксперимента при последовательном приложении ступенчатых возмущений. Установлено, что при повышении температуры сырья на входе на 50 °С, увеличении массового расхода нефти на 30 % и пятикратном росте влагосодержания регулируемая величина достигает экстремальных значений 410, 350 и 340 °С относительно уставки 370 °С при времени регулирования не более 15 000 с. Разработанная модель позволяет минимизировать отклонения технологического режима, обеспечивая условия для чёткого фракционирования.

Ключевые слова: математическая модель, нефтепереработка, трубчатая печь, тепловая инерционность, первичная переработка, передаточная функция

Для цитирования: Дмитриев В. А., Милушенко С. А., Беляев К. В. Математическая модель печи первичной переработки нефти. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 117–124. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-117-124>. EDN: NSVNV5.



© Дмитриев В. А., Милушенко С. А., Беляев К. В., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATHEMATICAL MODEL OF THE OIL PRIMARY PROCESSING FURNACE

V. A. Dmitriyev¹✉, S. A. Milyushenko¹, K. V. Belyaev²

¹Siberian State Automobile and Highway University,
Mira Ave., 5, Omsk, 644080, Russia

²Omsk Tank-Automotive Engineering Institute,
14th Voyenny gorodok, 119, Omsk, 644098, Russia

✉ vitaliy.dmitriyev.02@bk.ru

Improving the precision of automatic control systems for process heaters is a critical factor in optimizing crude oil primary distillation units. The article introduces a dynamic mathematical model designed to maintain tight control over the outlet temperature, a vital parameter for subsequent high-quality fractionation.

The object of the research is a gable barrel-type oil refinery furnace within a primary crude oil processing unit, featuring a temperature control loop for the petroleum product at the coil outlet based on fuel gas flow rate.

The modeling is based on the synthesis of transfer functions of system elements: the temperature sensor is represented as a first-order lag element, the actuator — as an integrating element, the control valve — as an aperiodic link and the controlled process — as an aperiodic link. A distinctive feature of the proposed approach is the comprehensive consideration of physicochemical factors: the variable calorific value of the fuel gas calculated via the Wobbe index; the heat accumulation capacity of the fire tube walls; and the dependence of crude oil specific heat capacity on its moisture content.

The simulation model is implemented in the SimInTech environment; the research is conducted using computational experiments involving the sequential application of step disturbances. Therefore, the authors conclude that with an increase in the feedstock inlet temperature by 50 °C, a 30 % rise in the mass flow rate of oil and a fivefold increase in moisture content, the controlled variable reaches extreme values of 410, 350 and 340 °C relative to the setpoint of 370 °C, with a regulation time not exceeding 15 000 seconds. The developed model enables minimization of technological regime deviations providing conditions for precise fractionation.

Keywords: mathematical model, oil refining, tube furnace, thermal inertia, primary processing, transfer function

For citation: Dmitriev V. A., Milyushenko S. A., Belyaev K. V. Mathematical model of the oil primary processing furnace. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):117–124. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-117-124>. EDN: NSNVNS. (In Russ.).



© Dmitriev V. A., Milyushenko S. A., Belyaev K. V., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Печь установки первичной переработки нефти является одним из центральных аппаратов, поскольку именно она определяет тепловой режим подогрева нефти и, как следствие, стабильность работы атмосферной колонны и качество получаемых фракций. Даже незначительные отклонения температуры сырья на выходе печи приводят к перераспределению компонентов между фракциями и ухудшению технико-экономических показателей процесса [1, 2].

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка математической модели печи, так как она обеспечивает понимание и взаимосвязь между различными параметрами — от горения до нагрева сырья. В том числе и моделирование остаётся актуальной задачей в условиях повышения требований к энергоэффективности, надёжности и экологической безопасности нефтеперерабатывающих производств [3, 4].

Общая информация об объекте управления

Рассматриваемый объект управления — двухскатная трубчатая печь шатрового типа — представляет собой многосвязную термодинамическую систему с распределёнными параметрами [5].

Архитектура объекта управления представлена на рис. 1. Она включает в себя радиантные камеры (1 и 2), в которых происходит горение жидкого и/или газового топлива, а также конвекционную секцию, которая расположена в центре (3). С точки зрения автоматического регулирования, ключевой спецификой объекта является тепловая инерционность, формирующаяся за счёт высокой способности накапливания огнеупорной кладки перевальных стен, а также значительного объёма топочного пространства. Данное свойство производит существен-

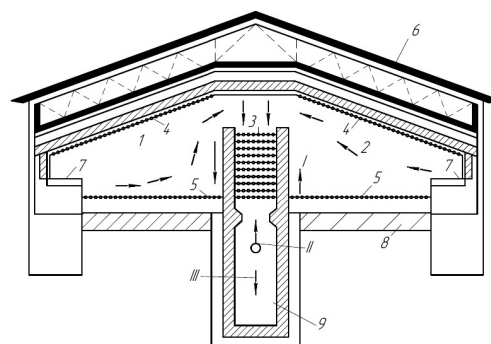


Рис. 1. Принципиальная схема двухскатной трубчатой печи шатрового типа:

- 1, 2 — радиантные секции; 3 — конвекционная секция;
- 4, 5 — экранные трубы (потолочные и подовые);
- 6 — несущий каркас; 7 — горелочные устройства;
- 8 — воздуховоды; 9 — дымовой канал;
- I, II — выходящий и входящий продукт;
- III — дымовые газы¹

Fig. 1. Schematic diagram of a double-pitched tent-roof tubular furnace: 1, 2 — radiant sections; 3 — convection section; 4, 5 — firewall tubes (ceiling and floor); 6 — supporting frame; 7 — burner devices; 8 — air ducts; 9 — smoke channel; I, II — outgoing and incoming product; III — flue gases¹

ное транспортное запаздывание: реакция температуры нагреваемого сырья на изменение подачи топлива происходит не сразу, а с экспоненциальным переходным процессом.

Производство тепловой энергии осуществляется в радиантных секциях посредством сжигания (жидкого или газообразного) топлива. Механизмом теплопередачи к экранным трубам выступает радиационный теплообмен, основным источником которого является светящийся факел. В межкамерном пространстве, ограниченном перевальными стена-

¹ Ентус Н. Р., Шарихин В. В. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Москва: Химия, 1987. 304 с.

ми, интегрирована конвекционная секция. Усиление теплообмена в данной секции реализуется посредством вынужденной конвекции при омывании восходящим потоком высокотемпературных дымовых газов трубного пучка. Подогрев нефтепродукта осуществляется двумя ступенями: поток первично аккумулирует тепловую энергию в конвекционной секции (доля передаваемого тепла — около 20–25 %) [6], после чего поступает в радиантную секцию, где воспринимает основную тепловую нагрузку (70–80 %)².

Подготовка горючей смеси протекает в горелочных устройствах, обеспечивающих смешение топлива с воздухом, что гарантирует полноту сгорания смеси. Аэродинамика факела спроектирована таким образом, чтобы его взаимодействие с футеровкой перевальных стен приводило к их интенсивному нагреву, формируя мощный вторичный источник инфракрасного излучения. Сами параметры факела (размер, температурный градиент и так далее) являются функцией множества переменных: коэффициента избытка и температуры дутьевого воздуха, а также конструктивных характеристик топочного объема³.

Архитектура системы автоматического управления (САУ) двухскатной шатровой печи П-1 отражена на функциональной схеме рис. 2. Транспортировка отбензиненной нефти в змеевики печи обеспечивается насосом Н-1. Стабилизация нагнетания реализуется посредством контура регулирования давления (первичный преобразователь 1а), сигнал с которого управляет частотным преобразователем (ЧП) электродвигателя. Далее магистральный поток

разделяется на два параллельных контура, мониторинг которых осуществляется датчиками давления (3а, 6а) и расхода (4а, 7а). Данные датчики передают аналоговые сигналы для формирования управляющих воздействий на исполнительные механизмы — регулирующие клапаны (4е, 7е). Давление пара к форсункам печи П-1 регистрируется и регулируется группой датчиков расхода (9а), давления (10а) и температуры (12а). Измерительная информация передается на уровень программируемого логического контроллера (ПЛК), алгоритм которого вычисляет и передает управляющее воздействие на регулирующий орган (10е).

Для обеспечения максимальной эффективности и гибкости регулирования печь П-1 оснащена комбинированной системой сжигания, используя топливный газ и мазут в качестве жидкого агента. Управление тепловой нагрузкой в радиантных камерах достигается за счёт расхода топливного газа клапанами (14е, 20е). Управление данными исполнительными механизмами построено на основе каскада: давление газа перед горелками (датчики 14а, 19а) с температурной компенсацией (16а, 18а). В качестве вспомогательного технологического мониторинга реализована регистрация температуры футеровки перевальных стен (13а, 21а), а также контроль температуры уходящих дымовых газов (17а).

Идентификация передаточных функций

Динамическая работа печи формируется под непрерывным воздействием массива возмущающих факторов⁴. Ключевыми из них выступают давление подаваемого топливного газа, а также КПД

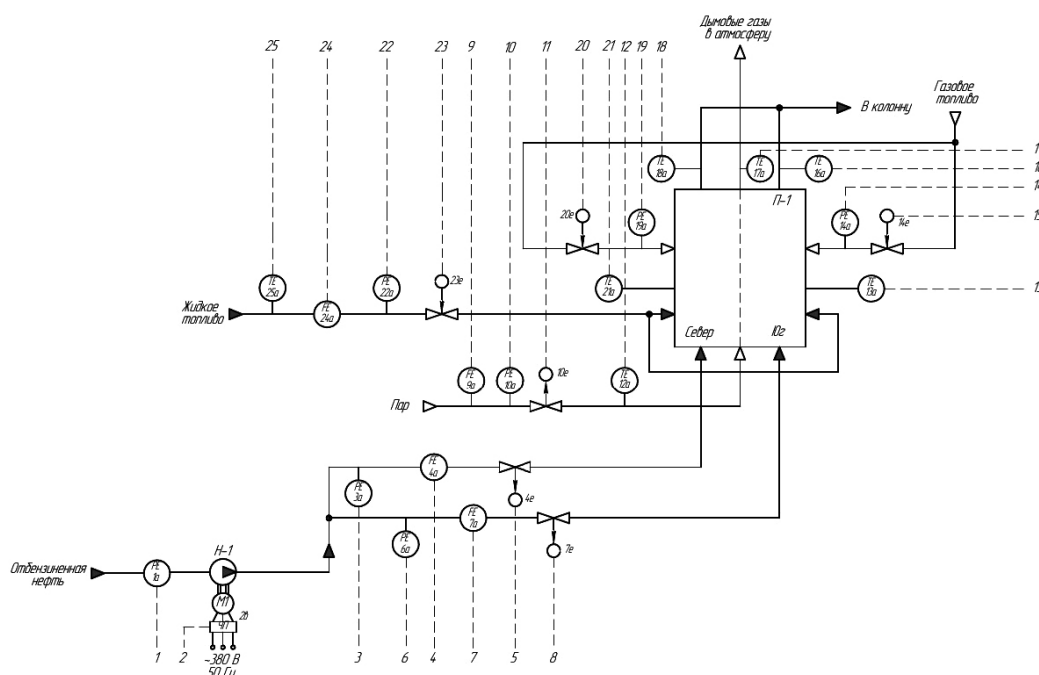


Рис. 2. Функциональная схема САУ двухскатной трубчатой печи П-1

Fig. 2. Functional diagram of the automatic control system of the П-1 double-pitched tubular furnace

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

² Ентус Н. Р., Шарихин В. В. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Москва: Химия, 1987. 304 с.

³ Ентус Н. Р., Шарихин В. В. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Москва: Химия, 1987. 304 с.

⁴ Лепешкин А. Р., Доронин Ю. А. Теория горения и взрыва: учебное пособие. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025. 85 с. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/5/tr25-85>.

горелочных устройств. На кинетику горения оказывают воздействие и условия дутьевого воздуха (температурный напор, барометрическое давление, влажность), и коэффициент его избытка. Кроме того, переходные характеристики объекта управления определены технологическими возмущениями со стороны сырья (массовый расход), коэффициентов теплоотдачи и активной площади теплообменной поверхности.

Взаимосвязи между этими многочисленными переменными и параметрами требуют создания строгой математической модели, позволяющей точно отразить динамическое поведение печи. Для разработки модели был выбран контур регулирования температуры нефти на выходе из печи газовым топливом.

Опишем передаточную функцию датчика температуры через уравнение:

$$Q_1(T) = Q_2(T, T_m) + Q_3(T, T_o(\alpha)) + Q_4(T(x)) + Q_5. \quad (1)$$

Теплопередача между датчиком и окружающей средой включает конвекцию, излучение, теплопроводность и накопление энергии. В уравнении (1) перечисленные компоненты обозначены следующим образом [7]:

— процесс накопления тепла Q_1 :

$$\frac{d\Delta Q_1(x)}{dt} = \Delta m(x) \cdot c \cdot x \cdot \frac{dT(x)}{dt}, \quad (2)$$

где $T(x)$ — температура термопары вдоль ее проводов и головки x ; Δm — масса в точке x ; c — удельная теплоемкость провода термопары;

— передача тепла за счёт конвекции Q_2 :

$$\frac{d\Delta Q_2(x)}{dt} = \Delta A(x) \cdot r(x) \cdot (T(x) - T_m(x)), \quad (3)$$

где ΔA — наружный уголок; $r(x)$ — локальный коэффициент конвективной теплоотдачи; $T_m(x)$ — температура измеряемой жидкости;

— теплообмен с окружающей средой посредством излучения Q_3 :

$$\frac{d\Delta Q_3(x)}{dt} = \sigma \cdot \sum_{\varphi} \Delta A(x) \cdot \varepsilon(\varphi) \cdot (T^4(x) - T_o^4(\varphi)), \quad (4)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана; ε — коэффициент излучения и температуры окружающей среды $T_o(\varphi)$, который меняется в зависимости от угла φ ;

— тепловой поток через провода термопары Q_4 :

$$\frac{dQ_4(x)}{dt} = -\lambda \cdot S(x) \cdot \frac{\partial(x)}{\partial x}, \quad (5)$$

где λ — теплопроводность сплавов датчика; $S(x)$ — площадь пересечения.

Хотя уравнение (1) показывает одновременный поток тепла по проводам, а также теплопередачу между проводами и окружающей средой, последний процесс зависит от местных условий; точная

модель должна состоять из трёхмерных уравнений в частных производных с распределёнными параметрами. С другой стороны, упрощение модели возможно, если один из факторов является доминирующим, как в случае измерения температуры твёрдых тел и жидкостей. Однако, несмотря на такую сложную модель, взаимосвязь между выходным сигналом датчика температуры T_s и измеренной температурой T_m сводится к динамике первого порядка, которую можно сформулировать в виде уравнения (6):

$$\frac{m_{eq} \cdot c_{mean}}{r_{mean} \cdot A_{eq}} \cdot \frac{dT_s}{dt} = T_m - \Delta T_m - T_s = K \cdot T_m - T_s. \quad (6)$$

В этом уравнении мы имеем эквивалентную массу m_{eq} и среднюю удельную теплоёмкость c_{mean} рассматриваемой массы, а также средний коэффициент теплопередачи r_{mean} и эквивалентную площадь A_{eq} , которые являются параметрами теплопередачи между датчиком и средой, для которой измеряется температура. Кроме того, ΔT_m — это температурная погрешность, обусловленная потерей тепла, которая может быть выражена как коэффициент усиления передаточной функции K . Предполагая использование незранированной термопары, применяется динамика первого порядка в виде передаточной функции (7), полученной из уравнения (6) по техническим характеристикам термопары $\tau = 10$ с:

$$F(s) = \frac{T_s(s)}{T_m(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}; \quad (7)$$

$$\tau = \frac{m_{eq} \cdot c_{mean}}{r_{mean} \cdot A_{eq}}. \quad (8)$$

Таким образом, передаточная функция датчика температуры выражается уравнением:

$$W_A = \frac{1}{10s + 1}. \quad (9)$$

Приводы в системах управления часто моделируются с использованием передаточных функций, которые включают динамику интегратора для учёта их физического поведения. Таким образом, сигнал поворота регулирующего органа имеет линейную зависимость [8]. Следовательно, передаточная функция привода будет выражаться уравнением:

$$W_{им} = \frac{0,00833}{s}. \quad (10)$$

Если выходной сигнал контроллера отличается от значения, соответствующего текущему установившемуся режиму на величину шага, положение регулирующего клапана не достигает нового требуемого значения мгновенно [9]. Это свидетельствует о необходимости учёта динамических характеристик исполнительного механизма и позиционера⁵.

В связи с этим передаточная функция регулирующего клапана в большинстве практических слу-

⁵ Теслов К. С., Гебель Е. С. Разработка каскадной системы автоматического управления многопоточной трубчатой печью нефтеперерабатывающей установки // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов. Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2024. С. 1908 — 1913. EDN: ESHOXS.

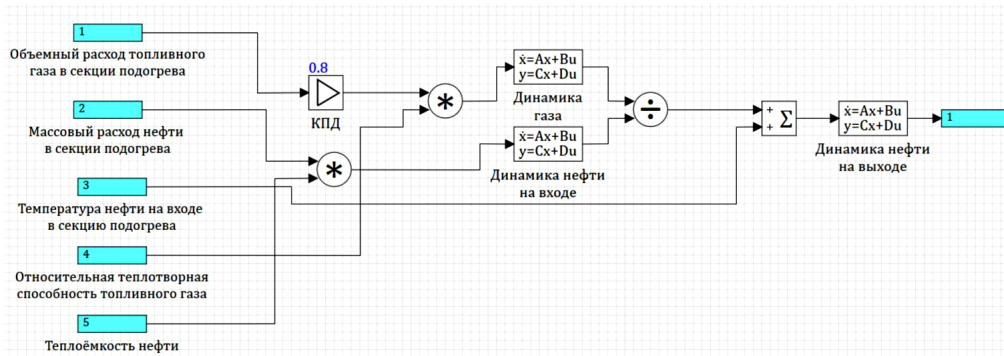


Рис. 3. Вид подсистемы «Объект управления»
Fig. 3. View of the "Control Object" subsystem

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

чаев может быть с достаточной точностью аппроксимирована передаточной функцией инерционного звена первого порядка и представлена в уравнении [10]:

$$W_{PK} = \frac{K}{Ts + 1} = \frac{7,5}{40s + 1}. \quad (11)$$

Числитель в уравнении (11) соответствует номинальному расходу подаваемого топливного газа, что детерминирует статический коэффициент передачи исполнительного механизма $K = 7,5$. Динамическая инерционность срабатывания регулирующего клапана (перемещение штока) учтена посредством постоянной времени $T = 40$ с.

Учитывая монотонный характер разгона и ёмкостные свойства футеровки, идентификация объекта будет в виде апериодического звена 1-го порядка. Коэффициент передачи по каналу управления температурой составляет $K = 0,4933$, что отражает установившуюся чувствительность теплового объекта к изменениям расхода топливного газа. Колоссальная теплоёмкость футеровки обуславливает высокую тепловую инерционность системы, которая в рамках апериодического звена соответствует постоянной времени $T = 650$ с.

С учётом полученных параметрических характеристик получается итоговая передаточная функция объекта управления в виде операторного уравнения:

$$W_{Oy} = \frac{0,4933}{650s + 1}. \quad (12)$$

Математическая модель

Построение модели расчёта для прогнозирования температуры нефтепродукта на выходе $T_{вых}$ из змеевика основывается на уравнении энергетического баланса:

$$T_{вых} = T_{вх} + 0,01 + V_{г} + \eta + \frac{Q_{г}}{G_{н} \cdot C_{н}}, \quad (13)$$

где $T_{вх}$ — температуры нефтепродукта на входе в змеевик, °C; $V_{г}$ — объёмный расход топливного газа, м³/ч; η — тепловой КПД печи, %; $Q_{г}$ — теплота сгорания топлива, МДж/м³; $G_{н}$ — массовый расход нефтепродукта, т/ч; $C_{н}$ — удельная теплоёмкость нефти, МДж/(т·град).

Устройство модели на рис. 3 учитывает характер тепло- и массообмена путём внедрения апериодических звеньев 1-го порядка:

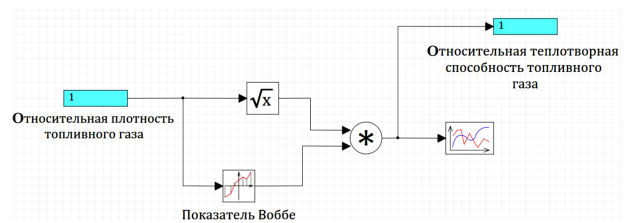


Рис. 4. Вид подсистемы «Теплотворная способность потока топливного газа»
Fig. 4. View of the "Calorific value of the fuel gas flow" subsystem

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

— введение динамического звена с постоянной времени $T_{gas} = 60$ с моделирует транспортное запаздывание и тепловую инерцию огнеупорной кладки;

— $T_{em_in} = 200$ с имитирует инерционность гидродинамического смещения и начального конвективного теплообмена на входе в печь;

— $T_{em_out} = 1000$ с отражает совокупную теплоёмкость потока на выходе из печи (при параметре $T_{em_in} = 200$ с).

Для программной реализации апериодических звеньев в модели используется матричное представление в пространстве состояний. Элементы матриц (A, B, C, D) рассчитываются по формуле [11–13]:

$$A = \frac{-1}{T_{об}}; B = 1; C = \frac{1}{T_{об}}; D = 0; I_0 = t_0 \cdot T_{об}, \quad (14)$$

где A, B, C, D — переменные состояния; $T_{об}$ — постоянная времени соответствующего объекта; I_0 — параметр начальных условий; t_0 — номинальное значение выходного параметра.

Показатель Воббе на рис. 4 реализует функцию кусочно-линейной интерполяции теплофизических свойств метана.

На основе входного вектора относительной плотности вычисляется итоговая теплотворная способность газовой смеси [14, 15]. Такой подход реализован и для непрерывного пересчёта удельной теплоёмкости нефти (рис. 5).

Разработанные функциональные блоки внедрены в подсистему объекта управления (рис. 6), что позволяет подавать ступенчатые возмущения по заданному временному алгоритму на входы, обеспечивая робастность замкнутого контура управления.

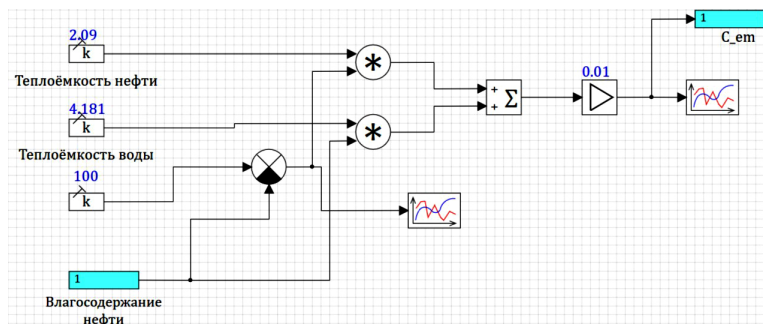


Рис. 5. Вид подсистемы «Расчёт показателя теплоёмкости нефти»

Fig. 5. View of the "Calculation of the heat capacity of oil" subsystem

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

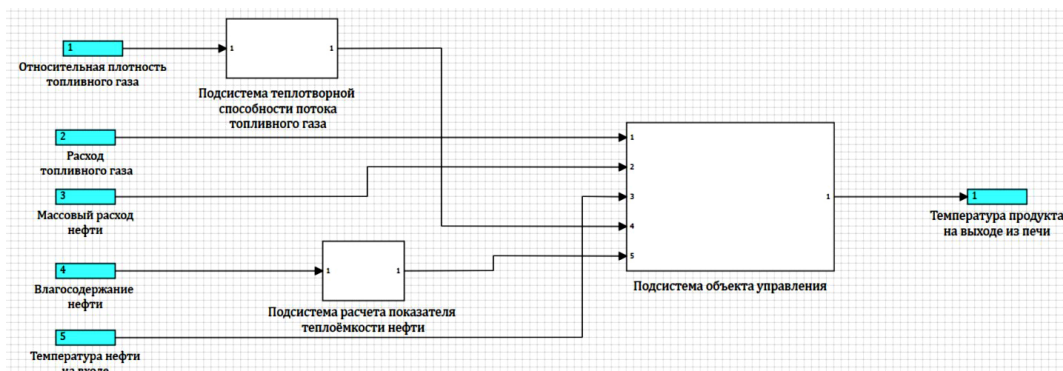


Рис. 6. Устройства подсистемы печи П-1

Fig. 6. Devices of the П-1 furnace subsystem

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

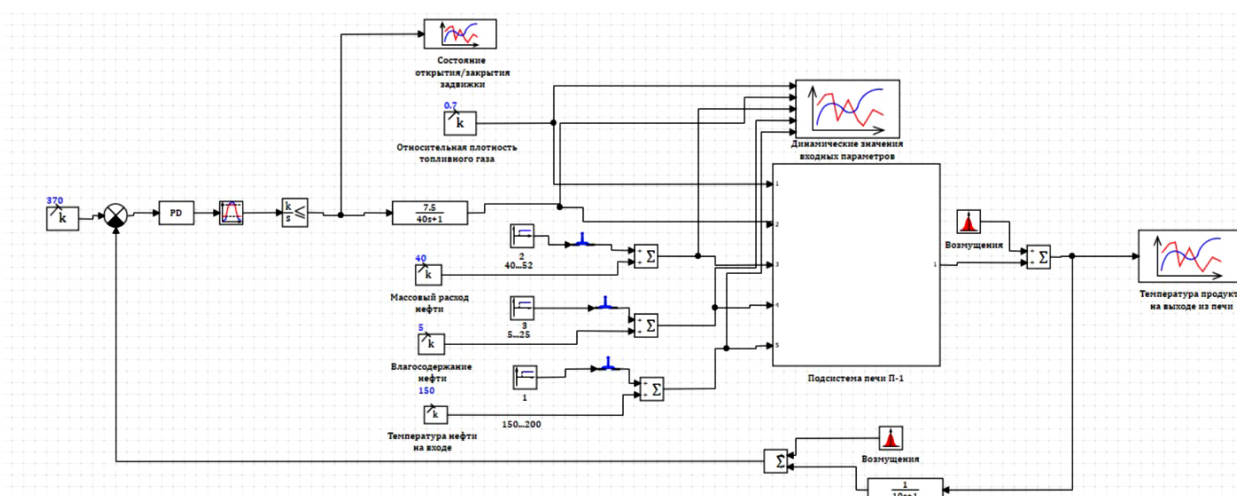


Рис. 7. Замкнутая система регулирования температуры

Fig. 7. Closed-loop temperature control system

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Математическая модель (рис. 7) отображает динамику работы печи с учётом внешних возмущений. Каждый входной параметр должен будет изменяться поочерёдно, чтобы регулятор смог стабилизировать систему.

На графике переходного процесса (рис. 8) наблюдается следующий характер поведения системы: в начальный период (0 ... 40 000 с) происходит выход на уставку 370 °С. Затем последовательно вводятся значительные возмущающие воздействия:

— скачкообразное повышение температуры нефти на входе в печь на 50 °С (с 150 до 200 °С),

вызывающее кратковременный перегрев выше 400 °С;

— ступенчатое увеличение массового расхода нефти на 30 % (с 40 до 52 т/ч), приводящее к снижению температуры до уровня около 340 °С;

— резкое возрастание влагосодержания нефти в 5 раз (с 5 до 25 %), также вызывающее заметное отклонение регулируемой величины.

Во всех рассмотренных случаях пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор демонстрирует высокую эффективность подавления возмущений, обеспечивая возвращение температу-

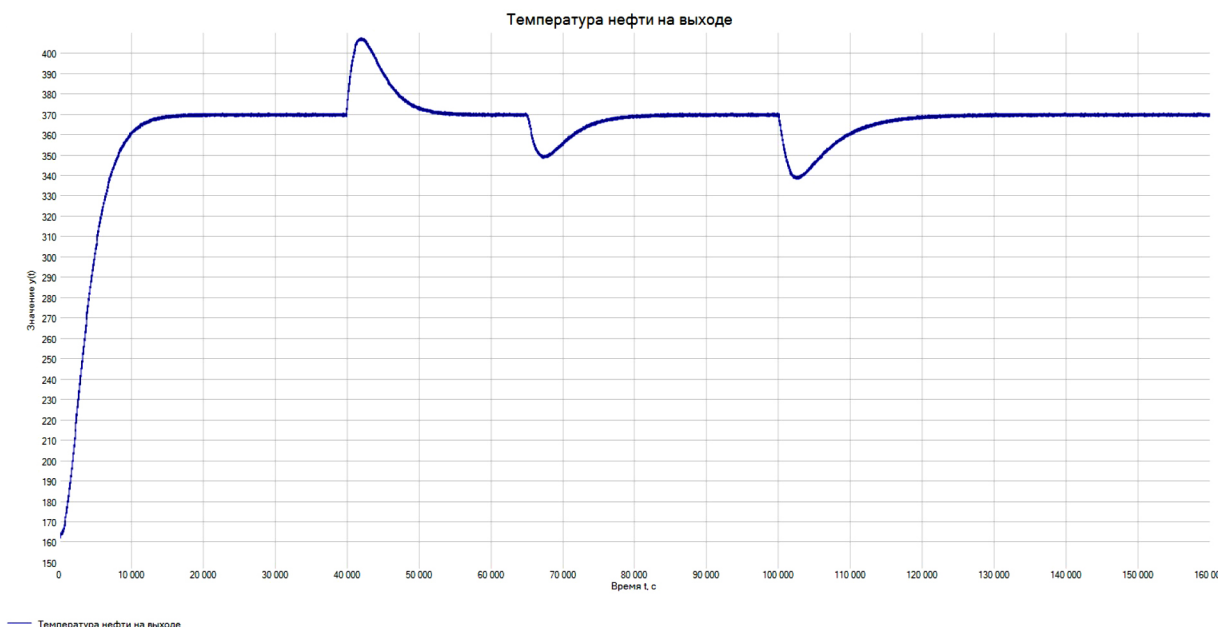


Рис. 8. Переходный процесс с постепенными возмущениями на печь
Fig. 8. Transient process with gradual disturbances on the furnace
 Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

ры к заданному значению 370 °С без существенного перерегулирования и с удовлетворительным временем регулирования.

Заключение

В ходе исследования была разработана имитационная модель системы автоматического регулирования температуры нефти на выходе из двухскатной трубчатой печи шатрового типа, включающая в себя передаточные функции датчика температуры, исполнительного механизма и объекта управления.

Новизна работы состоит в учете трех факторов: теплотворной способности топливного газа через показатель Воббе, аккумулирующей способности стенок жаровых труб и зависимости теплоёмкости сырья от его влагосодержания. Учет трех факторов позволил реализовать каналы возмущений, обычно не воспроизводимые в моделях трубчатых печей.

Созданная модель подтвердила работоспособность самого контура: при трех последовательных возмущениях регулируемая величина достигает экстремальных значений 410, 350 и 340 °С относительно уставки 370 °С при времени регулирования не более 15 000 с. Полученные показатели следует считать оценочными, так как модель верифицирована только средствами моделирования, а линеаризованное описание объекта справедливо в окрестности рабочей точки.

Предложенная модель применима на действующих нефтеперерабатывающих заводах в качестве предварительного этапа настройки регулятора до вывода на реальный контур, а также в качестве тренажёра для операторов установки, инженеров автоматизации и контрольно-измерительных приборов. Распространение модели на контур жидкого топлива будет представлено в следующих исследованиях.

Список источников / References

1. Jacas-Portuondo F., Peña-Pupo L., Forgas-Brioso M. R., Mulet-Hing M. Modelling of the tubular furnace for the heating crude oil. *Tecnología Química*. 2025;45:51 – 68.

2. Chen X. Temperature control in electric furnaces: Methods, applications, and challenges. *Journal of Physics Conference Series*. 2023;2649:012032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2649/1/012032>.
3. Hentati M., Boussetta A., Elleuch A., Halouani K. Technical, environmental and economic evaluation of a kW-level flared gas-fuel GT-SOFC hybrid system. *Energy Conversion and Management*. 2024;317:118825. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118825>.
4. Safarova A. A. Development of mathematical model of the main apparatus of the oil fractionation unit. *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2024;16(2):97 – 102. https://doi.org/10.52171/2076-0515_2024_16_02_97_102.
5. Liu L., Zhai R., Hu Y. Performance evaluation of wind-solar-hydrogen system for renewable energy generation and green hydrogen generation and storage: Energy, exergy, economic, and enviroeconomic. *Energy*. 2023;276:127386. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127386>.
6. Салякин А. Е., Гарифуллина Э. В., Бронская В. В., Мухаметзянова А. Г. Трубчатые печи первичной переработки нефти с использованием цифрового двойника // Компетентность. 2025. № 9. С. 46 – 49. <https://doi.org/10.24412/1993-8780-2025-9-46-49>. EDN: TLXWPX.
7. Salyakin A. E., Garifullina E. V., Bronskaya V. V., Mukhametzyanova A. G. Tubular furnaces for primary oil refining using a digital twin. *Competency*. 2025;9:46 – 49. <https://doi.org/10.24412/1993-8780-2025-9-46-49>. EDN: TLXWPX. (In Russ.).
8. Mei L., Yuan T., Jie W. [et al.]. Optimization of combustion parameters in the fire tube of water jacket heating furnace based on FLUENT. *Processes*. 2025;13(1):190. <https://doi.org/10.3390/pr13010190>.
9. Wang R., Qi B., Zhou Y. [et al.]. Numerical investigation on combustion and heating characteristics of metal fiber burner. *Energies*. 2023;16(11):4301. <https://doi.org/10.3390/en16114301>.
10. Gude J. J., Bringas P. G. Proposal of a general identification method for fractional-order processes based on the process reaction curve. *Fractal and Fractional*. 2022;6(9):526. <https://doi.org/10.3390/fractalfract6090526>.
11. Modelling and control of switched reluctance machines / ed. by R. E. Araújo, J. R. Camacho. London: IntechOpen, 2020. 158 p. ISBN 978-1-78984-455-9.

11. Tan W., Han W., Xu J. State-space PID: A missing link between classical and modern control. *IEEE Access*. 2022;10:116540–116553. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3218657>.
12. Yuan T., Wang C., Feng Q. [et al.]. Computational fluid dynamics simulation on oxy-fuel combustion performance of a multiple-burner furnace firing coking dry gas. *Applied Thermal Engineering*. 2024;252:123728. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123728>.
13. Dong L., Huang S., Qian B. [et al.]. Numerical Simulation of hydrogen-coal blending combustion in a 660 MW tangential boiler. *Processes*. 2024;12(2):415. <https://doi.org/10.3390/pr12020415>.
14. Zhou Z., Han X., Jin G. [et al.]. New coefficients of the weighted-sum-of-gray-gases model for gas radiation characteristics of hydrogen/natural gas blends combustion. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2023;149:107090. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107090>.
15. Fan G., Chen M., Wang C. [et al.]. Numerical study on oxy-fuel combustion characteristics of industrial furnace firing coking dry gas. *Energy*. 2024;286:129643. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129643>.

Вклад авторов:

В. А. Дмитриев. Постановка цели и задач исследования, разработка архитектуры математической модели объекта управления, аналитический расчёт статических и динамических коэффициентов апериодических звеньев 1-го порядка, программная реализация имитационной модели в SimInTech.

С. А. Милушенко. Проведение анализа предметной области, разработка общей методологии исследования, верификация адекватности результатов математического моделирования и научное редактирование рукописи.

К. В. Беляев. Оценка практической значимости разработанной модели, анализ эксплуатационной надёжности и отказоустойчивости созданной системы управления, экспертная оценка применимости результатов исследования для обеспечения технологических процессов производства нефтепродуктов.

Authors' contribution:

Vitaliy A. Dmitriev. Setting research goal and objectives, developing the architecture of a mathematical model of a control object, analytical calculation of static and dynamic coefficients of aperiodic links of the 1st order, software implementation of a simulation model in SimInTech.

Sergey A. Milyushenko. Conducting an analysis of the subject area, developing a general research methodology, verifying the adequacy of mathematical modeling results, editing of the text.

Konstantin V. Belyaev. Assessment of the practical significance of the developed model, analysis of the operational reliability and fault tolerance of the created control system, expert evaluation of the research findings' applicability for ensuring petroleum product manufacturing processes.

Информация об авторах:

ДМИТРИЕВ Виталий Андреевич, магистрант кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностро-

ение» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), г. Омск.

e-mail: vitaliy.dmitriyev.02@bk.ru

МИЛЮШЕНКО Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение» СибАДИ, г. Омск.

SPIN-код: 4080-6327

AuthorID (РИНЦ): 650473

e-mail: sergey19812003@mail.ru

БЕЛЯЕВ Константин Владимирович, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика» Омского автобронетанкового инженерного института, г. Омск.

SPIN-код: 9227-7073

AuthorID (РИНЦ): 191199

e-mail: bkv775@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.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 03.02.2026; одобрена после рецензирования 07.08.2026; принята к публикации 21.08.2026.

Information about the authors:

DMITRIEV Vitaliy Andreyevich, Master's Student of the Automation and Power Engineering Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk.

e-mail: vitaliy.dmitriyev.02@bk.ru

MILYUSHENKO Sergey Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Automation and Power Engineering Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk.

SPIN-code: 4080-6327

AuthorID (RSCI): 650473

e-mail: sergey19812003@mail.ru

BELYAEV Konstantin Vladimirovich, Associate Professor of the Electrical Equipment and Automation Department, Omsk Tank-Automotive Engineering Institute, Omsk.

SPIN-code: 9227-7073

AuthorID (RSCI): 191199

e-mail: bkv775@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 authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 03.02.2026; approved after reviewing 07.08.2026; accepted for publication 21.08.2026.

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