

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

# ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НАУЧНЫЙ

2023

№ 2 (186)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,  
ФОТОНИКА,  
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ  
И СВЯЗЬ



# ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издаётся с октября 1997 г.  
Выходит 4 раза в год

№ 2 (186) 2023

## 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://journals.omgту.ru>

Страница журнала на сайте учредителя:  
[http://www.omgту.ru/  
general\\_information/media.omgту/  
journal\\_of\\_omsk\\_research\\_journal/](http://www.omgту.ru/general_information/media.omgту/journal_of_omsk_research_journal/)

Подписной индекс  
в каталоге Роспечать 83597

Ответственный секретарь  
М. Ф. Федорчук

Редактор  
Т. П. Семина

Компьютерная верстка  
О. Н. Чирун

Макет обложки  
В. С. Гуринов

© Редакция журнала  
«Омский научный вестник», ОмГТУ

Подписано в печать 02.06.2023 г.  
Дата выхода в свет 14.06.2023 г.

Формат 60x84 1/8. 16,97 усл. печ. л.  
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе  
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.  
(1-й завод 1–100). Заказ 25  
Цена свободная

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- КОСЫХ Анатолий Владимирович**, главный редактор, д. т. н., профессор, 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
- 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
- ГРАДОБОВЕВ Александр Васильевич**, д. т. н., профессор, Томский политехнический университет, г. Томск
- ЗАХАРЕНКО Владимир Андреевич**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- 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
- КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович**, д. т. н., профессор, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск
- МАЙСТРЕНКО Василий Андреевич**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- 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
- 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
- ПОПОВ Евгений Владимирович**, д. т. н., профессор, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород
- 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, Нижневартовский 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., Омский государственный технический университет, г. Омск
- ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, д. т. н., профессор, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск
- ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович**, д. т. н., доцент, Омский государственный технический университет, г. Омск
- 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
- ЯКОВЛЕВА Елена Владимировна**, д. э. н., доцент, Омский государственный технический университет, г. Омск



## OMSK SCIENTIFIC BULLETIN

Published Since October 1997.  
Published 4 times a year

**№ 2 (186) 2023**

### FOUNDER

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

Federal State Budgetary  
Educational Institution  
of Higher Education «Omsk State  
TransportUniversity»

Identification number  
of registered Mass Media  
PII № TY55-00559 from 06.10.2017  
issued by the Federal Service for  
Supervision of Communications,  
Information Technology,  
and Mass Media, Omsk region

Journal Website:  
<https://journals.omgту.ru>

Journal Page on Founder's Website:  
[http://www.omgту.ru/  
general\\_information/media.omgту/  
journal\\_of\\_omsk\\_research\\_journal/](http://www.omgту.ru/general_information/media.omgту/journal_of_omsk_research_journal/)

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

Executive Secretary  
M. F. Fedorchuk

Editor  
T. P. Semina

Computer Page-Proofs  
O. N. Chirun

Cover Layout  
V. S. Gurinov

© Editorial Board of  
«Omsk Scientific Bulletin»,  
OmSTU

Signed in Print 02.06.2023  
Date of Publication 14.06.2023

Format 60x84 1/8.  
Conventional  
Printed Sheets 16,97  
Offset Paper

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

Circulation 500 Copies.  
(The 1st Printing Factory 1–100).  
Order 25  
Open Price

## EDITORIAL STAFF

**KOSYKH Anatoly Vladimirovich (Chief Editor)**, D. Sc. (Technical), 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

**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

**ZAKHARENKO Vladimir Andreyevich**, D. Sc. (Technical), Professor,  
Omsk State Technical University, Omsk, 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

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

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

**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, The Republic of Kazakhstan

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

**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

**POPOV Evgeniy Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Professor,  
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,  
Nizhny Novgorod, 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),  
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

**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

<b>А. Г. Варепо, А. В. Боярникова, Е. В. Леонгардт.</b> Системный подход к решению проблемы обучения персонала на основе использования методологии 8D	5
<b>С. В. Корнеев, С. В. Пашукевич.</b> Влияние гранулометрического состава дисульфида молибдена на смазывание подшипников качения	13
<b>В. А. Короткий, Е. А. Усманова.</b> Бикубическая ленточная поверхность	19
<b>Ф. Н. Притыкин, И. С. Кузнецов.</b> Геометрическое моделирование процессов выполнения подкопочных работ экскаватором с целью предотвращения повреждения стенки трубопровода	28
<b>К. В. Сызранцева, Н. А. Василега.</b> Оценка вероятности отказа при эксплуатации сборного режущего инструмента со сменными многогранными пластинами методами непараметрической статистики	35
<b>Д. И. Чернявский, Д. Д. Чернявский.</b> Исследование упругопластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее вальцевании	44
<b>В. Ю. Юрков.</b> Аппроксимация двумерных множеств точечными конфигурациями	55
<b>К. В. Аверков, Д. С. Макашин.</b> Использование технического зрения в гибких производственных системах для определения координат беспорядочно расположенных объектов	60
<b>Ж. А. Назарова.</b> Перспективы развития графической подготовки студентов технических вузов	67
<b>В. Ю. Соломин, А. О. Штриплинг.</b> Использование метода анализа иерархий при выборе пылеочистительного оборудования литейного производства	73
<b>К. А. Шумилов, Ю. А. Гурьева.</b> Пластичные формы архитектуры в Dynamo-Revit и Grasshopper-Rhino-Archicad	82
<b>А. В. Князев, Ю. Ю. Черемухина.</b> Нормативно-методическое обеспечение стандартизации технологии блокчейн	91
<b>Ю. С. Яковлева, А. Н. Бирюков.</b> Моделирование физических характеристик теплоаккумулирующих строительных материалов	97
<b>А. А. Сычева, А. М. Плаксин.</b> Функционально-воксельный алгоритм итерационной композиции сложных контуров	105

## ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, А. Ю. Милютин, А. П. Попов.</b> Оптимизация величины неравномерного воздушного зазора синхронной машины с постоянными магнитами на роторе	112
<b>Е. Б. Королева, С. М. Курмашев, К. К. Ким, А. А. Ткачук, А. А. Кузнецов.</b> Устройства экспресс-диагностирования силовых полупроводниковых приборов и полупроводниковых преобразователей	119
<b>А. Р. Петров, Е. И. Грачева.</b> Моделирование потерь мощности в контактных системах низковольтных коммутационных аппаратов	126

## ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

<b>С. В. Бирюков.</b> Исследование электроиндукционного дискового датчика напряженности электрического поля	134
<b>С. С. Колмогорова, С. В. Бирюков.</b> Использование электроиндукционного датчика для отслеживания подвижных и неподвижных объектов наблюдений	140

# CONTENTS

---

## MECHANICAL

<b>L. G. Varepo, L. V. Boyarnikova, E. V. Leongardt.</b> The systematic approach to solving the problem of personnel training based on use of 8D methodologies	5
<b>S. V. Korneev, S. V. Pashukevich.</b> The influence of granulometric composition of molybdenum disulfide on lubrication of rolling bearings	13
<b>V. A. Korotkiy, E. A. Usmanova.</b> Bicubic ribbon surface	19
<b>F. N. Pritykin, I. S. Kuznetsov.</b> Geometric modeling of the processes of excavation by an excavator in order to prevent damage to the pipeline wall	28
<b>K. V. Syzrantseva, N. A. Vasilega.</b> Estimation of the probability of failure during operation of a prefabricated cutting tool with replaceable polyhedral plates by nonparametric statistics methods	35
<b>D. I. Chernyavsky, D. D. Chernyavsky.</b> Study elastoplastic bending of a sheet blank of different thickness while rolling	44
<b>V. Yu. Yurkov.</b> Approximation of planar point sets by point configurations	55
<b>K. V. Averkov, D. S. Makashin.</b> The use of technical vision in flexible production systems to determine coordinates of randomly located objects	60
<b>Zh. A. Nazarova.</b> Prospects for development of graphic training of students of technical universities	67
<b>V. Yu. Solomin, L. O. Shtripling.</b> Using the Hierarchy Analysis Method when choosing dust cleaning equipment for foundry	73
<b>K. A. Shumilov, Yu. A. Guryeva.</b> Plastic forms of architecture in Dynamo-Revit and Grasshopper-Rhino-Archicad	82
<b>A. V. Knyazev, Yu. Yu. Cheremukhina.</b> Regulatory and methodological support of blockchain technologies	91
<b>Yu. S. Yakovleva, A. N. Biryukov.</b> Modeling of physical characteristics of heat-accumulating building materials	97
<b>A. A. Sycheva, A. M. Plaksin.</b> The functional voxel algorithm for iterative composition of complex contours	105

## ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

<b>V. V. Kharlamov, Yu. V. Moskalev, A. Yu. Milutin, A. P. Popov.</b> Uneven air gap optimization of synchronous machine with permanent rotor magnets	112
<b>E. B. Koroleva, S. M. Kurmashev, K. K. Kim, A. A. Tkachuk, A. A. Kuznetsov.</b> Devices for express diagnostics of power semiconductor devices and semiconductor converters	119
<b>A. R. Petrov, E. I. Gracheva.</b> Modeling of power losses in contact systems of low-voltage switching devices	126

## ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

<b>S. V. Biryukov.</b> Study of electroinductive disk sensor of electric field strength	134
<b>S. S. Kolmogorova, S. V. Biryukov.</b> Using electro-inductive sensor to trace moving and non-moving objects tracked	140

УДК 004.451.2

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-5-12

Л. Г. ВАРЕПО  
Л. В. БОЯРНИКОВА  
Е. В. ЛЕОНГАРДТ

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОЛОГИИ 8D

В статье рассматривается порядок управления несоответствиями на примере элемента «Обучение персонала», входящего в процесс «Менеджмент ресурсов» с применением методологии 8D. Разобран случай выявления коренной причины проблемы, возникающей при дистанционном обучении для работников предприятий закрытого типа; разработаны корректирующие и предупреждающие действия. Проведен расчет оценки результативности и составлена форма отчета по методологии 8D.

**Ключевые слова:** методология 8D, FMEA-анализ, управление рисками, обучение, корректирующие действия, предупреждающие действия.

**Введение.** Конкурентоспособность современного предприятия напрямую зависит от оперативности и эффективности действий, направленных на управление любыми видами несоответствий, независимо относятся ли они к возникновению некачественной продукции или несоответствию требований процессов.

В последнее время для быстрого выявления и устранения коренных причин несоответствий, а также разработки корректирующих и предупреждающих действий на производстве все чаще используется метод 8D [1–9]. Например, в работе [3] отмечено, что в рамках нового подхода к методологии применение метода командной работы 8D, с привлечением представителя высшего руководства, обеспечением постоянной ресурсной поддержки, позволило выявить причины несоответствия, снижения качества и безопасности продукции.

Актуальность применения данного метода обусловлена, прежде всего, возможностью решать междисциплинарные задачи с минимальными вре-

менными затратами на основе разработки плана корректирующих действий, направленных на устранение проблем, мобилизации при этом инициативы сотрудников различных рангов и привлечение к решению проблемы.

**Постановка проблемы.** Однако метод 8D вполне может быть применим и для улучшения процессов СМК. В связи с этим целью данной работы стало решение проблемы, связанной с дистанционным повышением квалификации работников предприятий закрытого типа с использованием методологии 8D. Процедура «Обучение персонала» входит в подпроцесс «Человеческие ресурсы» процесса «Менеджмент ресурсов» и позволяет обеспечивать требуемую компетентность специалистов, увеличивает уровень их мотивации и качества работы.

8D — это «Метод восьми дисциплин» предложенный компанией Ford Motors в 1987 году и разработанный на основе американского военного стандарта MIL STD 1520. В методике используется принцип фокусированного решения системных проблем

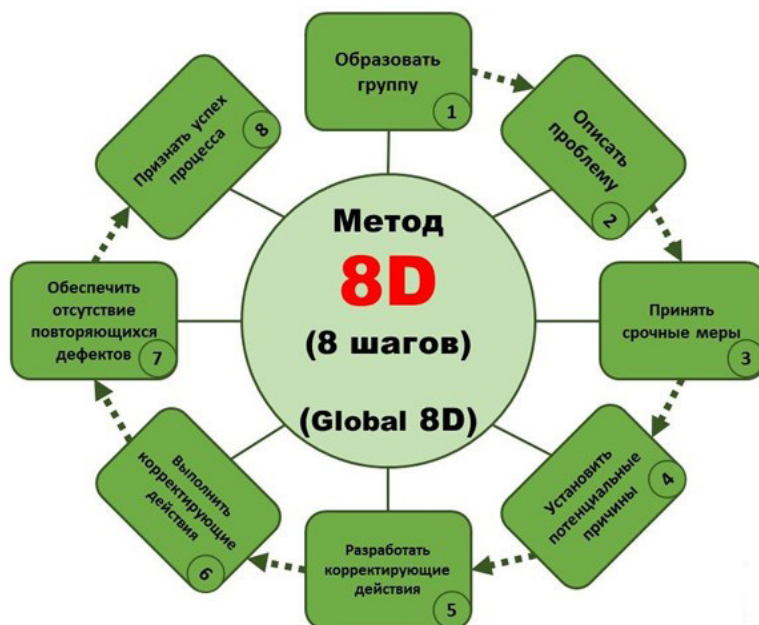


Рис. 1. Структура метода 8D [8]

не только с оборудованием, качеством, но и безопасностью.

Он состоит из последовательности закрепленных методикой действий (алгоритма действий из восьми основных шагов), которые определенным способом документируются и предназначены для решения типовых проблем, не имеющих очевидных и легко определяемых причин. Каждый шаг отвечает за конкретный набор действий с определенными критериями (рис. 1).

Форма отчёта 8D [2] может рассматриваться в качестве объективного свидетельства выполнения требований, прописанных в п. 10.2.2 [10].

Отличительная особенность отчета — инструмент организации командной работы, основа которого в наличии основополагающих выводов после каждого шага.

**Решение проблемы обучения персонала на основе использования методологии 8D.** Кроме восьми основных ступеней D1-D8, метод содержит **подготовительный этап D0** и завершающий этап опубликования окончательного отчета.

На **этап D0** происходит определение целесообразности использования 8D, его инициирование и использование немедленных ответных действий. D0 включает стандартные оценочные критерии, которые призваны обеспечить выбор наиболее подходящей методологии в ситуации ограниченности ресурсов.

**Подготовка** заключается в анализе поступившей информации о несоответствии (жалоба, рекламация, дефект, акт входного контроля, служебная записка и т. д.) с точки зрения необходимости применения метода 8D для его устранения и предотвращения появления в будущем. В качестве примера рассмотрен случай непосещения обучающего курса группой слушателей, направленных на повышение квалификации и, поскольку данная проблема для предприятия была не единичной, было принято решение о применении метода 8D.

**Этап D1** — Определение руководителя процесса, выбор лидера команды и формирование команды. Реализация его происходит после фиксации информации от организации, предоставляющей об-

Таблица 1

Форма журнала регистрации по этапам D0-D2

<b>D0.</b> Наименование организации, выставившей претензию/рекламацию (номер письма, дата электронного обращения)	Организация N, «___» _____ 202__ г.		
<b>D1. Создание МФК</b>	ФИО, отдел, должность	Телефон	Электронная почта
Руководитель команды	директор по управлению персоналом	XX	XX-XX-XX
Команда в составе	ведущий специалист и специалист по обучению персонала	XX	XX-XX-XX
Координатор отчета	руководитель центра обучения и развития персонала	XX	XX-XX-XX
<b>D2. Описание проблемы</b>			
Из $N_1$ человек, которые должны были пройти повышение квалификации по программе «ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Главные изменения. Сравнительный анализ с предыдущей версией» $N_2$ сотрудника пропускали оплаченные предприятием занятия			

## Разработка немедленных действий

3. Немедленные действия (коррекция)	Ответственный исполнитель	Срок выполнения	Выполнено в срок
<b>3.1. Анализ отправки на повышение квалификации сотрудников</b>	специалист по обучению персонала	«__» ____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля
Комментарии: — Начальник отдела ФИО (начальника) подал заявку на обучение N <sub>1</sub> работников (ФИО и должности); — Наименование направления, по которому будет осуществляться обучение «ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Главные изменения. Сравнительный анализ с предыдущей версией»; — Вид обучения — <b>офлайн, заменен на онлайн</b> ; — Цель обучения: повышение квалификации (ГОСТ ISO/IEC 17025-2019) — С «__» ____ 202__г. сотрудники были отправлены на обучение — Заключение договора на профессиональное обучение (подготовку) согласно СТО по подготовке и повышению квалификации персонала			
<b>3.2. Анализ работы персонала, задействованного в отправке на обучение</b>	специалист по обучению персонала	«__» ____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля
Комментарии: Специалист по обучению персонала ФИО имеет стаж работы 2 года, аттестован «__» ____ 202__г. Согласно плану обучения, сотрудники должны проводить контроль посещаемости и успеваемости слушателей			
<b>3.3. Анализ контроля оповещений обучающегося персонала</b>	специалист по обучению персонала	«__» ____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля
<b>Комментарии:</b> Необходимо оповещать обучаемых сотрудников	Собраны данные по информированности и причинах пропуска занятий путем индивидуального обзвона		

Таблица 3

## Метод 5Why

	Метод решения проблемы «5 почему?»	Почему случилось несоответствие	Почему несоответствие не было выявлено?
<b>D4. Определение корневой причины</b>	<b>Проблема (дефект)</b>	<b>Сотрудник пропустил онлайн курсы по обучению</b>	
	<b>Почему?</b>	Не смог выйти на онлайн платформу обучения	Не осуществлялась смена формата обучения с частичным отрывом от производства
	<b>Почему?</b>	Обучение с частичным отрывом от производства предполагает нахождение на предприятии, где нет сети во время учебы	
	<b>Почему?</b>	На предприятии запрещен выход в интернет	
	<b>Почему?</b>	Предприятие закрытого типа, разрешено использование только локальной сети	
	<b>Почему?</b>	В целях сохранения конфиденциальной информации нет компьютеров, имеющих доступ в Интернет	
	<b>Корневая причина</b>	<b>Нет соответствующего места для дистанционного формата обучения персонала</b>	

разовательные услуги, Центр обучения и развития персонала предприятия, определил состав многофункциональной команды, численность которой обычно зависит от сложности проблемы. В данном случае в качестве ответственного изначально был назначен специалист по обучению персонала, далее по мере расширения области решения проблемы были подключены ведущий специалист и руководитель центра обучения.

Эффективность подбора команды обеспечивается применением принципа 5М при ее подборе. Каждая «М» охватывает определенную группу факторов, оказывающих влияние на исследуемую проблему: «Man» — персонал; «Machinery» —

оборудование; «Material» — материалы, сырье; «Method» — технология; «Measurement» — измерение.

Первым действием команды является описание проблемы (**этап D2**), на основе максимально собранной информации по проблеме из объективных источников. Заполненная форма по этапам D0-D2 представлена в табл. 1.

В качестве немедленных сдерживающих действий (табл. 2), которые должны быть предприняты **на уровне D3**, был проведен индивидуальный обзвон всех слушателей курса, пропускающих занятия с целью проверки информированности и выявления причин отсутствия.

## Разработка корректирующих действий

D5. Разработка корректирующих действий			D6. Выполнение и подтверждение корректирующих действий (валидация)
Мероприятие	Ответственный исполнитель	Срок выполнения	Выполнено в срок
5.1. Обеспечить сотрудников рабочими местами для дистанционного обучения. Оформление служебной записки на конкретное время для конкретного списка обучающихся. Информирование сотрудников об обеспечении аудитории на территории предприятия во время учебы	ведущий специалист специалист по обучению персонала	«__» _____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля
5.2. Обеспечить доступ слушателей в аудиторию	специалист по обучению персонала	«__» _____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля
5.3. Провести оценку результативности внедренного мероприятия. Связь с образовательной организацией	специалист по обучению персонала	«__» _____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля

Таблица 5

## Действия по предупреждению повторения проблемы

D7. Действия по предупреждению повторения проблемы				
Мероприятие	Ответственный исполнитель		Срок выполнения	Выполнено в срок
7.1. Анализ риска и определение необходимости внесения его в реестр и разработки предупреждающих действий	ведущий специалист по обучению персонала		«__» _____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля
Разработка протокола FMEA	Z = 245	специалист по обучению персонала	«__» _____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля
Принятие решения о внесении в реестр рисков	Да	ведущий специалист по обучению персонала	«__» _____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля
Принятие решения о необходимости разработки предупреждающих действий	Да	руководитель отдела по ОП	«__» _____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля
7.2. Разработка графика обучения в компьютерном классе	ведущий специалист по обучению персонала		«__» _____ 202__г.	На 100 % Снято с контроля
7.3. Информирование слушателей за неделю до обучения о предоставлении аудитории, оборудованной компьютерами, проведение пробного занятия	специалист по обучению персонала		В соответствии с графиком	
7.4. Внесение изменений в стандарт организации по обучению персонала с учетом возможности дистанционного обучения	ведущий специалист по обучению персонала		«__» _____ 202__г.	

Основой методики является установление на этапе D4 коренных причин (например, путем тестирования) и возможности их негативного влияния в других подобных ситуациях. Осуществляется определение и проверка точки выявления — самой ранней точки в процессе, где можно обнаружить последствия проблемы, что и является результатом

выполнения данного шага. Для полноценного понимания ситуации необходимо на рабочем месте собрать факты, проанализировать их и непосредственно на месте принять решение. Выбор методов анализа основывается на целесообразности их использования для получения конечного результата, а нахождение точки выявления проблемы позво-

## Оценка результативности

Показатель	Формула	Оценка результативности
Количество слушателей, обеспеченных аудиторией/ Количество сотрудников, нуждающихся в оборудовании и аудитории	$N/N_s$	$27/27 = 1$

Таблица 7

## Закрытие отчета

D8. Закрытие отчета				
Отчеты 8D будут закрыты и сняты с контроля по результатам выполнения всех запланированных действий				
Согласовано: При разработке _____	Должность	Подпись	Дата	ФИО
Руководитель МФК	руководитель центра обучения и развития персонала	—	—	—
Согласовано	генеральный директор организации	—	—	—
	директор по управлению персоналом организации	—	—	—

ляет прервать процесс реализации ее последствий [11].

В результате анализа комплекта документов члены команды отметили, что наибольшее количество пропусков наблюдается в группах, где форма офлайн обучения заменена на онлайн.

Для отделения внешних симптомов от истинных причин наиболее часто применяются методы «5 почему», диаграммы «Черепашка» [12], причинно-следственной связи и «Галстук-бабочка».

С помощью метода «5 Why?» (табл. 3) было выявлено, что на предприятии нет соответствующего места для дистанционного формата обучения персонала и для его организации необходимо иметь помещение, оборудованное компьютерами с доступом в интернет и не подключенных к локальной сети предприятия.

На этапе D5 определяют постоянные корректирующие действия (табл. 4), направленные на устранение корневой причины, обеспечивающие полное исключение или снижение вероятности перехода причины в проблему. Эти действия должны быть не только практичными и выполнимыми, но и экономически целесообразными.

Так, в качестве подобных действий после экономического анализа была выбрана организация рабочих мест для проведения занятий на предприятии, а не перевод сотрудников на обучение с полным отрывом от производства.

Если причину невозможно полностью устранить, то необходимо разрабатывать меры контроля, позволяющие на ранней стадии прогнозировать проблемы и принимать необходимые меры для минимизации их последствий.

На этапе D6 ответственные осуществляют запланированные корректирующие мероприятия в соответствии с установленными сроками. Если их выполнение занимает продолжительное время, а результаты одних действий являются основой следующих, то рекомендуется промежуточный контроль.

Целью следующего этапа метода (D7) является предотвращение рецидива проблемы с помощью предупреждающих действий.

Формулировка их основывается на риск-ориентированном подходе.

Существуют различные способы оценки рисков [13] и способы их применения. Наиболее часто расчет рисков в рамках требований к СМК производится при помощи анализа причин и последствий отказов (FMEA), с оценкой вероятности возникновения, тяжести последствий и (реже) вероятности необнаружения несоответствия по 10-балльной шкале, с разработкой предупреждающих действий для рисков, получивших значение ПЧР больше 100–120.

В результате анализа проблемы — с отсутствием условий для дистанционного обучения, был разработан комплекс предупреждающих мер в виде алгоритма действий ответственного за обучение персонала. Он включал утверждение графика работы специализированного компьютерного класса, гармонизированного с графиком дистанционного обучения, информирование слушателей, с проведением пробного занятия до начала обучения, формирование служебных записок в случае внепланового изменения формата обучения и др. После апробации предложенных мер на практике они были закреплены в СТО по подготовке и повышению квалификации персонала.

Пример отчета по этапу D7 приведен в табл. 5.

Если на этом этапе установлено, что проблема может вернуться по той же причине, всю работу, начиная с четвертого шага, придется провести заново. Если возникновение проблемы возможно, но в силу других причин, проявившихся после устранения корневой причины, команда должна вернуться на пятый шаг.

На восьмом этапе (D8) проводится подведение итогов, поощрение команды по усмотрению руководителя, оцениваются и документируются конкретные результаты работы. Цель данного этапа:

- составить комплект документов и проанализировать работу команды;
- определить результативность (табл. 6) предупреждающих действий по итогам их применения за год.

Принятые предупреждающие действия были признаны результативными, поскольку в разработанном и закреплённом СТО алгоритме, при дальнейшей организации дистанционного обуче-

ния специалистов, недостатков не обнаружилось, все 27 нуждающихся в оборудовании слушателей были обеспечены им без проблем и в необходимые сроки.

На завершающем этапе исполнители мероприятий по факту их выполнения информируют отдел менеджмента качества (ОМК), предоставляют объективные свидетельства/документы (акты, отчеты, протоколы и т. д.), подтверждающие выполнение и результативность предпринятых действий. Форма отчета по этапу D8 представлена в табл. 7. Сохранение материалов всего цикла 8D является обязательным условием данного шага.

После выполнения всех мероприятий процедуру можно считать законченной, а 8D-отчет закрытым. Срок хранения 8D-отчетов с комплектом подтверждающих документов обычно составляет от 2 до 5 лет.

**Заключение.** Очевидным преимуществом применения рассмотренной методологии 8D в рамках СМК является системность и комплексность управления несоответствиями, которая позволяет не разбивать коррекцию, корректирующие и предупреждающие действия на отдельные процедуры, а решать проблему от начала и до конца, оформляя эти действия единым документом.

Дополнительные возможности применения методологии 8D дает автоматизация процедур при помощи программных продуктов. В настоящее время они, к сожалению, в большей степени ориентированы на решение проблем промышленного производства (например, система «8D.Управление несоответствиями» ПО АСКОН), однако с учащением практики применения 8D для управления несоответствиями процессов СМК рынок предложений в этой области однозначно будет расширяться.

#### Библиографический список

1. Павлюк А. К., Меркушева Н. И. Анализ применения методологии 8D на российских предприятиях // Молодой ученый. 2015. № 1 (81). С. 267–269.
2. Юрченко С. В. Методология 8D: системное исключение проблем с учетом требований потребителя // Методы менеджмента качества. 2021. № 4. С. 28–34.
3. Афанасьева Н. О., Куцына И. В. Применение на предприятии метода командной работы 8D (на примере ООО «Бондюэль-Кубань»). URL: <https://studylib.ru/doc/2297120/udk-005.22-primenenie-na-predpriyatii-metoda-ko-mandnoj> (дата обращения: 10.02.2023).
4. Балукова М. В. 8D и «Шесть сигм» на саратовских предприятиях // Методы менеджмента качества. 2006. № 2. URL: <https://ria-stk.ru/mmqa/adetail.php?ID=44390> (дата обращения: 10.02.2023).
5. Орешин А. Н. Корректирующие мероприятия. Практическое применение 8D (Eight Discipline) методологии на предприятии автомобильной промышленности. URL: <http://quality.eur.ru> (дата обращения: 10.02.2023).
6. 8D — метод решения проблем. URL: <http://qualitymanager.ru/8d> (дата обращения: 10.02.2023).

7. Валько Е. В., Гетманова А. В. Методика 8D как инновационное решение проблем, связанных с качеством в производственном процессе // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2015. № 8. URL: <https://ekonomika.snauka.ru/2015/08/9629> (дата обращения: 10.02.2023).

8. Метод 8D «8 шагов» // Global 8D. URL: <https://iambuilding.ru/stati/kaizen/metod-8d-8-shagov-global-8d/> (дата обращения: 10.02.2023).

9. Методика «8d» как инструмент управления. URL: <https://docvie-wer.yandex.ru/view/0/> (дата обращения: 10.02.2023).

10. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. Введ. 2015–11–01. Москва: Стандартинформ, 2015. 50 с.

11. Юрченко С. В. Методология 8D: систематическое исключение проблем с учетом требований потребителя. Часть 1 // Методы менеджмента качества. 2021. № 3. С. 36–41.

12. Леонгардт Е. В. Совершенствование процесса внутреннего аудита системы менеджмента качества в организации // Метрология, стандартизация и управление качеством: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. (Омск, 14–20 октября 2018 г.). Омск: Изд-во ОмГТУ, 2022. С. 47–51.

13. ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. Введ. 2020–03–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 82 с.

**ВАРЕПО Лариса Григорьевна**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 4980-6679

ORCID: 0000-0001-5366-2700

AuthorID (SCOPUS): 6507043152

ResearcherID: B-1163-2015

Адрес для переписки: [larisavarepo@yandex.ru](mailto:larisavarepo@yandex.ru)

**БОЯРНИКОВА Людмила Валерьевна**, старший преподаватель кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3016-8733

AuthorID (РИНЦ): 685943

Адрес для переписки: [boarnikova\\_lv@mail.ru](mailto:boarnikova_lv@mail.ru)

**ЛЕОНГАРДТ Екатерина Викторовна**, магистрант гр. СМм-211 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: [kleongardt141198@mail.ru](mailto:kleongardt141198@mail.ru)

#### Для цитирования

Варепо Л. Г., Боярникова Л. В., Леонгардт Е. В. Системный подход к решению проблемы обучения персонала на основе использования методологии 8D // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-5-12.

Статья поступила в редакцию 17.03.2023 г.

© Л. Г. Варепо, Л. В. Боярникова, Е. В. Леонгардт

## THE SYSTEMATIC APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF PERSONNEL TRAINING BASED ON USE OF 8D METHODOLOGIES

The article discusses the procedure for managing inconsistencies using the example of the «personnel training» element, which is part of the «resource management» process using the 8D methodology. The case of identifying the root cause of the problem arising during distance learning for employees of closed-type enterprises has been analyzed, corrective and preventive actions have been developed. The calculation of the performance assessment was carried out and the report form was compiled according to the 8D methodology.

**Keywords:** 8D methodology, FMEA analysis, risk management, training, corrective actions, preventive actions.

### References

1. Pavlyuk A. K., Merkusheva N. I. Analiz primeneniya metodiki 8D na rossiyskikh predpriyatiyakh [Analysis of the application of the 8D methodology at Russian enterprises] // Molodoy uchenyy. *Young Scientist*. 2015. No. 1 (81). P. 267–269. (In Russ.).
2. Yurchenko S. V. Metodologiya 8D: sistemnoye isklyucheniye problem s uchedom trebovaniy potrebitelya [Methodology 8D: system exclusion of problems taking into account the requirements of the consumer] // Metody menedzhmenta kachestva. *Methods of Quality Management*. 2021. No. 4. P. 28–34. (In Russ.).
3. Afanas'yeva N. O., Kutsyna I. V. Primeneniye na predpriyatii metoda komandnoy raboty 8D (na primere OOO «Bondyuel'-Kuban'») [Application of the method in the enterprise teamwork 8D (for example «Bonduelle-Kuban» LLC)]. URL: <https://studylib.ru/doc/2297120/udk-005.22-primenenie-na-predpriyatii-metoda-ko-mandnoj> (accessed: 10.02.2023). (In Russ.).
4. Balukova M. V. 8D i «Shest' sigm» na saratovskikh predpriyatiyakh [Metody menedzhmenta kachestva 8D and Six Sigma at Saratov enterprises] // Metody menedzhmenta kachestva. *Methods of Quality Management*. 2006. No. 2. URL: <https://ria-stk.ru/mmq/adetail.php?ID=44390> (accessed: 10.02.2023). (In Russ.).
5. Oreshin A. N. Korrektiruyushchiye meropriyatiya. Prakticheskoye primeneniye 8D (Eight Discipline) metodologii na predpriyatii avtomobil'noy promyshlennosti [Corrective measures. Practical application of the 8D (Eight Discipline) methodology in the automotive industry]. URL: <http://quality.eup.ru> (accessed: 10.02.2023). (In Russ.).
6. 8D — metod resheniya problem [8D problem solving method]. URL: <http://quality-manager.ru/8d> (accessed: 10.02.2023). (In Russ.).
7. Val'ko E. V., Getmanova A. V. Metodika 8D kak innovatsionnoye resheniye problem svyazannykh s kachestvom v proizvodstvennom protsesse [Methods 8D as an innovative solution to the problems associated with the quality of the production process] // *Ekonomika i menedzhment innovatsionnykh tekhnologiy. Economics and Innovations Management*. 2015. No. 8. URL: <https://ekonomika.snauka.ru/2015/08/9629> (accessed: 10.02.2023). (In Russ.).
8. Metod 8D «8 shagov» / Global 8D [The Method 8D «8 steps» // Global 8D]. URL: <https://iambuil-ding.ru/stati/kaizen/metod-8d-8-shagov-global-8d> (accessed: 10.02.2023) (In Russ.).
9. Metodika «8d» kak instrument upravleniya [«8D» methodology as a management tool]. URL: <https://docvie-wer.yandex.ru/view/0/> (accessed: 10.02.2023). (In Russ.).
10. GOST R ISO 9001-2015. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [Quality management systems. Requirements]. Moscow, 2015. 50 p. (In Russ.).
11. Yurchenko S. V. Metodologiya 8D: sistematicheskoye isklyucheniye problem s uchedom trebovaniy potrebitelya. Chast'1 [8D methodology: systematic exclusion the problems with considering the customer requirements. Part 1] // Metody menedzhmenta kachestva. *Methods of Quality Management*. 2021. No. 3. P. 36–41. (In Russ.).
12. Leongardt E. V. Sovershenstvovaniye protsessov vnutrennego audita sistemy menedzhmenta kachestva v organizatsii [Improving the process of internal audit of the quality management system in an organization] // Metrologiya, standartizatsiya i upravleniye kachestvom. *Metrology, Standardization and Quality Management*. Omsk, 2022. P. 47–51. (In Russ.).
13. GOST R 58771-2019. Menedzhment riska. Tekhnologii otsenki riska [Risk management. Risk Assessment Technologies]. Moscow, 2019. 82 p (In Russ.).

**VAREPO Larisa Grigorievna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.  
SPIN-code: 4980-66-79  
ORCID: 0000-0001-5366-2700  
AuthorID (SCOPUS):6507043152  
ResearcherID: B-1163-2015  
Correspondence address: [larisavarepo@yandex.ru](mailto:larisavarepo@yandex.ru)

**BOYARNIKOVA Lyudmila Valeryevna**, Senior Lecturer of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3016-8733

AuthorID (RSCI): 685943

Correspondence address: boyarnikova\_ly@mail.ru

**LEONGARDT Ekaterina Viktorovna**, Undergraduate gr. SMm-211 of Elite Education and Magistracy of Faculty, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: kleongardt141198@mail.ru

#### For citations

Varepo L. G., Boyarnikova L. V., Leongardt E. V. The systematic approach to solving the problem of personnel training based on use of 8D methodologies // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-5-12.

Received March 17, 2023.

© L. G. Varepo, L. V. Boyarnikova, E. V. Leongardt

## ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА НА СМАЗЫВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

В работе были проведены лабораторные испытания по оценке износа подшипников качения на машине трения СМЦ-2 в зависимости от гранулометрического состава (до 1 и до 7 мкм) и концентрации дисульфида молибдена, добавленного в базовое индустриальное масло И-ГТ-А-100 (И-50А), производимое по ГОСТ 20799-2022. В ходе проведения испытаний были получены численные значения состояния износа четырех подшипников, обозначено среднее значение. Определены зависимости концентрации дисульфида молибдена с гранулометрическим составом до 1 и до 7 мкм от уровня износа и средней температуры подшипника при проведенных испытаниях.

**Ключевые слова:** смазочные материалы, подшипники качения, пластичные смазки, дисульфид молибдена, гранулометрический состав, индустриальное масло.

**Введение.** Как правило, твердые компоненты, вводимые в смазочные материалы, используются тогда, когда жидкие смазочные материалы не отвечают требованиям для данного применения. В условиях высокого или сверхвысокого вакуума жидкие смазочные материалы могут интенсивно испаряться таким образом, что они не смогут выполнять свою основную функцию — смазывание подвижных деталей техники и потенциально могут загрязнить устройство. Аналогичным образом жидкие смазочные материалы могут разлагаться или окисляться при высоких температурах. При криогенных температурах жидкие смазочные материалы могут терять подвижность и переходить в твердое состояние или становиться слишком вязкими [1].

Под воздействием радиации или агрессивных газов жидкие смазочные материалы могут разлагаться. В случаях, когда загрязнение является серьезной проблемой, жидкие смазочные материалы могут быть непригодны, поскольку они, как правило, улавливают пыль и другие загрязняющие вещества из окружающей среды. В случае если обслуживание затруднено или невозможно, может оказаться нецелесообразным использовать жидкую смазку, которая со временем разлагается, особенно при длительном хранении или простое оборудования. Твердые компоненты, вводимые в смазочные материалы, решают многие из этих проблем [2].

Например, движущиеся системы в космосе включают транспортные средства, спутники, телескопы, антенны и подвижные средства. Такие си-

стемы должны работать в течение длительных периодов времени практически без обслуживания в широком диапазоне экстремальных условий окружающей среды. Поскольку большинство космических применений работают в вакуумных средах, типичной твердой смазкой является дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ). В отличие от графита, для использования которого в качестве смазки требуется достаточное давление водяных паров,  $\text{MoS}_2$  лучше всего работает в условиях вакуума. Типичными примерами компонентов для космических применений, которые уже используют  $\text{MoS}_2$ , являются шарикоподшипники, направляющие механизмы, скользящие кольца, шестерни и механизмы расщепления [3].

Основной смазочных свойств дисульфида молибдена является его ламинарная структура. Каждая пластинка состоит из двух слоев атомов серы, между которыми находится слой атомов молибдена. В результате слабых связей между слоями одна пластинка атомов материала легко скользит по другой, придавая ей низкие характеристики сдвига в компаунд [4].

Скорость окисления дисульфида молибдена на воздухе зависит в первую очередь от температуры, а количество продуктов окисления зависит от времени воздействия. Заметного окисления до 400 °С не наблюдается, при данной температуре начинает образовываться тонкая пленка оксида молибдена. Между 427 °С ~ и 455 °С происходит медленное, но заметное окисление. Выше 455 °С образуется желтовато-белый оксид молибдена, а скорость

Условия проведения экспериментов

Масла, марка	Вид трения	Материал подшипника	Частота вращения, с <sup>-1</sup>	Нагрузка, Н
И-ГТ-А-100	Подшипники качения № 80204	Сталь ШХ – 15	16,6	1500

окисления увеличивается, становясь очень быстрой при температуре выше 600 °С [5, 6].

Коэффициент трения дисульфида молибдена низок, что демонстрирует его преимущества перед другими твердыми добавками к смазочным материалам.

Однако коэффициент трения дисульфида молибдена зависит от многих переменных, среди которых температура, относительная влажность, толщина пленки, тип и твердость смазываемого металла, нагрузка и чистота материала.

В отличие от других твердых добавок к смазочным материалам, дисульфид молибдена обладает высокой адгезией. Он откладывается на поверхностях металлов, придавая им низкую прочность на сдвиг при относительном перемещении, обусловленную его ламинарной структурой [7]. Подобного рода материалы типа диселинида молибдена и других соединений чрезвычайно дороги и по стоимостным показателям значительно уступают дисульфиду молибдена.

То, насколько хорошо работает смазка MoS<sub>2</sub>, будет зависеть от ряда уже рассмотренных факторов, таких как нагрузка, скорость, температура, чистота и тип металла. Другие переменные зависят от способа применения [8].

Пленки MoS<sub>2</sub> химически инертны и термически стабильны при температурах более высоких, чем те, которым могут подвергаться их обычные углеводородные носители. Они долговечны, а срок их службы зависит от условий нанесения и эксплуатации [9].

Данные о функциях MoS<sub>2</sub> в качестве присадки в практических условиях использования и испытаний указывают на то, что он работает в масле и пластичной смазке так, как можно было бы ожидать от его свойств в качестве смазки с сухой пленкой. Такие результаты свидетельствуют о том, что в тех случаях, когда механическое движение периодически стирает, откачивает или срезает масляные пленки, добавление MoS<sub>2</sub> к маслу или пластичной смазке может обеспечить вторичную защиту при смазывании. Когда масляная пленка временно удаляется, пленка из MoS<sub>2</sub> на металлических опорных поверхностях будет поддерживать смазку до тех пор, пока масляная пленка восстанавливается либо путем ослабления давления, вытесняющего ее из соединения, либо путем повторного смазывания. Более того, в отличие от добавок, содержащих серу и хлор, которые требуют высоких температур для образования пленок сульфида или хлорида железа, дисульфид молибдена не нуждается в высоких температурах для образования защитной пленки на металлических или других несущих поверхностях [10].

Благодаря этим уникальным характеристикам дисульфид молибдена используется крупными нефтяными компаниями в качестве добавки к смазкам шасси для автомобилей и к железнодорожной смазке для цапф и подшипников.

Его также добавляют в составы для соединения инструментов и, в ограниченных количествах, в смазки для горловин роликов.

**Лабораторные исследования.** Для оценки противозносных свойств масел, используемых для смазывания узлов трения с высокими контактными давлениями (трансмиссии подвижной техники), использовались серийные подшипники качения № 80204. Подшипник устанавливался вместо вращающегося ролика, а колодка (контртело) использовалась для ограничения вращения внешнего кольца подшипника и для его нагружения. Испытания подшипников проводились на машине трения СМЦ-2. Схема трения: вращающееся внутреннее кольцо подшипника, внешнее кольцо фиксировалось колодкой в неподвижном состоянии. Характеристики испытаний: частота вращения внутреннего кольца (600 об/мин), нагрузка моделировалась пружинной системой нагружения, которая характерна для узлов трансмиссий — подшипников качения с необходимыми контактными давлениями. Условия проведения экспериментов представлены в табл. 1. Смазывание осуществлялось путем погружения подшипника в смазочный материал на глубину, большую толщины внешнего кольца. Это обеспечивает попадание смазочного материала и MoS<sub>2</sub> в зону трения.

Длительность эксперимента подбиралась с учетом классической зависимости износа от наработки, которая характеризуется интенсивным износом в период приработки и умеренным увеличением износа пропорционально времени работы узла в нормальном режиме. Предварительные эксперименты в течение 0,5; 1; 3 и 6 часов, при использовании чистых масел, подтвердили пропорциональность зависимости износа от наработки и показали, что сокращение времени испытаний до 0,5 часа практически не влияет на достоверность и точность результатов.

При подготовке к испытаниям подшипники № 80204 предварительно прирабатывались. Для получения достоверных результатов испытаний экспериментально установлены рациональные условия обработки подшипников (промывки, сушки). Промывку необходимо осуществлять в бензине по ТУ 6-15-788-78 с загрязненностью, соответствующей 6–7 классу чистоты по ГОСТ 17216-2001, вращением (60 об/мин) в течение 0,8 часа. Продолжительность сушки — 1,2 часа.

Для оценки влияния присадки дисульфида молибдена на эксплуатационные свойства масел был взят MoS<sub>2</sub> с гранулометрическим составом до 1 мкм (предоставленный для испытаний горно-металлургической компанией ПАО «ГМК» «Норильский никель» и промышленный дисульфид молибдена марки ДМ по ТУ 48-19-133-90 с гранулометрическим составом до 7 мкм.

Дисульфид молибдена добавлялся в пробы масла в концентрациях от 0,05 % до 0,3 %. Для обеспечения необходимой точности экспериментов с каждой концентрацией присадки проводилось

Результаты испытания присадки MoS<sub>2</sub>

Базовое масло	Концентрация MoS <sub>2</sub>	Гранулометрический состав MoS <sub>2</sub> мкм	Износ подшипника, г			
			1	2	3	4
И-ГТ-А-100	—	—	0,0444	0,0405	0,0150	0,0122
	0,05	1	0,0022	0,0007	0,0002	0,0017
	0,10	1	-0,0046	-0,0009	-0,0022	-0,0010
	0,15	1	-0,0019	-0,0009	-0,0009	-0,0004
	0,2	1	0,0019	0,0020	0,0029	0,0029
	0,3	1	0,0022	0,0017	0,0023	0,001
	0,05	7	0,0005	0,0042	0,0015	0,0026
	0,10	7	0,0007	0,0009	0,0006	0,001
	0,15	7	0,0021	0,0020	0,0022	0,0013
	0,2	7	0,007	0,0054	0,0008	0,0008
	0,3	7	0,0006	0,0017	0,0015	0,0002

по 4 испытания. При регистрации температуры подшипника определялось среднее значение из 4 полученных данных. В связи с тем, что дисульфид молибдена является дорогостоящим продуктом, его вводят в качестве добавки в минимальных концентрациях. Низкое содержание дисульфида молибдена в масле объясняется длительным взвешенным состоянием в жидких средах. Промышленностью выпускается дисульфид молибдена с гранулометрическим составом до 7 микрон. На данный момент на рынке рассматриваемая добавка представлена в двух вариантах — с гранулометрическим составом до 1 и 7 микрон. Дисульфид молибдена с крупным гранулометрическим составом особенно эффективен при обеспечении приработки крупных подшипников качения, где более мелкий продукт в значительной мере неэффективен. Это делает необходимым оценить влияние гранулометрического состава дисульфида молибдена на работу в подшипниках качения.

В процессе испытаний регистрировались износ по массе и температура подшипника. Износ определялся весовым методом на аналитических весах типа «АДВ-200М», температура — прибором «THERMISTOR» фирмы «KOMATSU». Полученные результаты сведены в табл. 2.

**Обсуждение экспериментов.** Анализируя рис. 1, замечаем, что добавление в промышленное масло дисульфида молибдена с гранулометрическим составом до 1 мкм носит наиболее благоприятный эффект по своим противоизносным свойствам в сравнении с MoS<sub>2</sub> с гранулометрическим составом до 7 мкм. Также отметим, что более рациональными концентрациями дисульфида молибдена с гранулометрическим составом до 1 мкм выступают значения от 0,07 до 0,15% по массе. При этих концентрациях значения износа имеют отрицательные значения из-за отложений MoS<sub>2</sub> на поверхностях трения за счет высоких адгезионных свойств [4, 7], что увеличивает массу деталей пар трения. Это также приводит к увеличению площади контакта деталей, а следовательно, и к уменьшению контактных давлений. Подобные процессы шаржирования поверхностей трения наблюдаются у различных материалов. Примером может служить трение пары «баббит — сталь», когда механические примеси изменяют

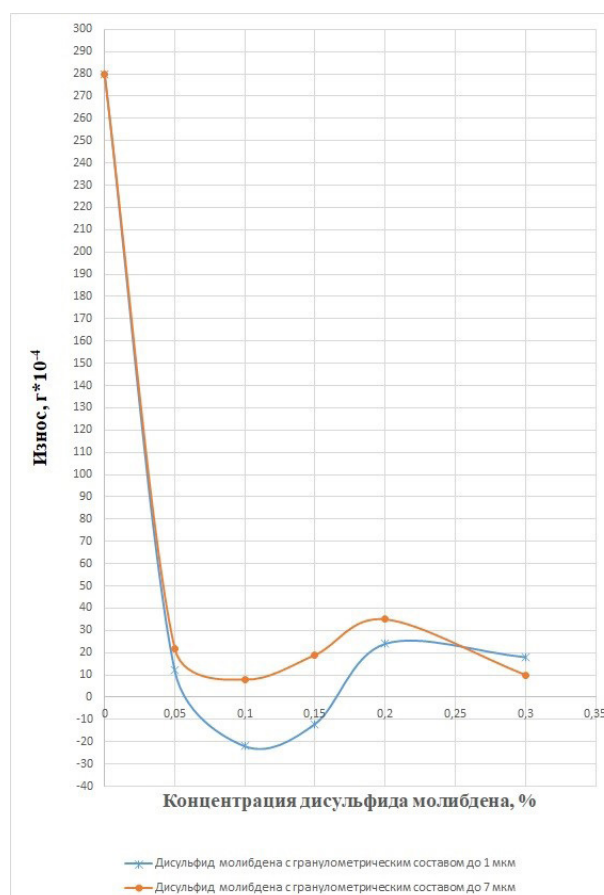


Рис. 1. Зависимость износа подшипника качения № 80204 от концентрации дисульфида молибдена в индустриальном масле И-ГТ-А-100

поверхностную твердость и шероховатость мягкого баббита [11]. Подобные процессы происходят при введении различных твердых добавок, что приводит к изменению показателей трущихся поверхностей (увеличению площади контакта и, как следствие, к уменьшению контактных давлений, увеличению поверхностной твердости и другим), что характерно для поверхностной обработки деталей.

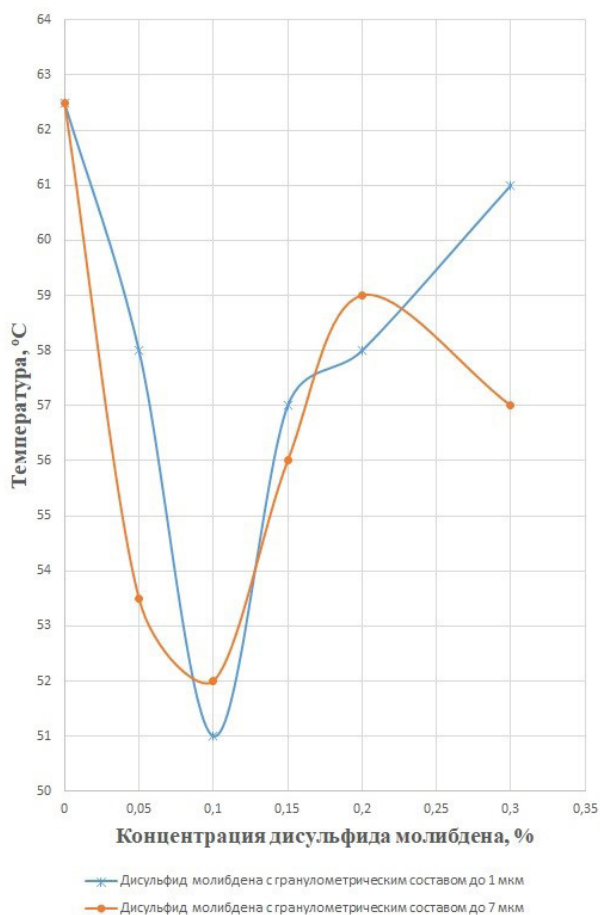


Рис. 2. Зависимость средней температуры подшипника качения № 80204 от концентрации дисульфида молибдена в индустриальном масле И-ГТ-А-100

Исследованиями И. А. Буяновского [11–14] установлено, что процессы трения и интенсивности износа коррелируются с температурой в околосредоточной зоне пары трения (зона расположения термпары на минимальном расстоянии при процессе трения). Все процессы трения являются диссипативными (процессы с выделением и рассеиванием тепловой энергии). Чем выше интенсивность износа деталей, тем большее количество тепловой энергии выделяется и тем выше температура узла. На представленных зависимостях (рис. 1, 2) видно, что минимальная температура в околосредоточной зоне соответствует точке минимальной интенсивности износа, которая наблюдается при концентрации  $\text{MoS}_2$  в районе 0,1 %. Это объясняется уменьшением затрат энергии на трение и износ, что и вызывает уменьшение температуры в околосредоточной зоне и подтверждает результаты испытаний, приведенных на рис. 1.

Внедрение введения  $\text{MoS}_2$  в индустриальные и турбинные масла оборудования подразделений МУП «Водоканал» г. Омска подтвердило эффективность полученных при испытаниях результатов.

#### Выводы

1. Дисульфид молибдена является противозадирной присадкой и положительно влияет на эксплуатационные свойства масел при работе узлов трения с высокими контактными давлениями. При работе подшипников качения № 80204 целесообразно добавлять в базовое масло дисульфид молибдена с гранулометрическим составом до 1 мкм в концентрации 0,07–0,15 % по массе. При таких концентра-

циях износ подшипников минимален и снижение его происходит более чем на порядок при применении индустриального масла без добавки  $\text{MoS}_2$ .

2. Дисульфид молибдена с гранулометрическим составом до 1 мкм превосходит по своим противозадирным свойствам промышленный с гранулометрическим составом до 7 мкм.

3. Результаты испытаний дают основание для широкого использования дисульфида молибдена с гранулометрическим составом до 1 мкм при смазывании механических передач подвижной техники.

#### Библиографический список

1. Рыков Е. В., Штокал А. О., Говорун Т. А. [и др.]. Исследование стойкости твердого смазочного покрытия на основе дисульфида молибдена к фреттинг-износу в условиях вибрационного нагружения // Научные технологии. 2019. Т. 20, № 2. С. 40–47.
2. Bojarska Z., Kopytowski J., Mazurkiewicz-Pawlicka M. [et al.]. Molybdenum disulfide-based hybrid materials as new types of oil additives with enhanced tribological and rheological properties // Tribology International. 2021. Vol. 160. 106999. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106999.
3. Kumar R., Banga H. K., Singh H. [et al.]. An outline on modern day applications of solid lubricants // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 28. P. 1962–1967. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.558.
4. Щегольков А. В., Захват М. М. А., Земцова Н. В. [и др.]. Математическое описание процесса механоактивации  $\text{MoS}_2$  и мунт для моторного топлива и масла // Наука в Центральной России. 2022. № 3 (57). С. 103–110.
5. Singh A., Chauhan P., Mamatha T. G. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 25. P. 586–591. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.245.
6. Saidi M. Z., Akram H., Achak O. [et al.]. Effect of morphology and hydrophobization of  $\text{MoS}_2$  microparticles on the stability of poly- $\alpha$ -olefins lubricants // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2019. Vol. 572. P. 174–181. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.04.003.
7. Антонова Н. М., Шоркин В. С., Ромашин С. Н. [и др.]. Адгезия вибрационного механохимического твердосмазочного покрытия  $\text{MoS}_2$  // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. № 9. С. 67–74.
8. Иванов В. В., Попов С. И., Донцов Н. С. [и др.]. Влияние вибрационных твердосмазочных покрытий на качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей транспортных машин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 6 (136). С. 5–13. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-6-5-13.
9. Ким К. К., Колесова А. В. Моделирование характеристик скользящего контакта // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. № 2. С. 60–76. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-2-60-76.
10. Baş H., Özen O., Beşirbeyoğlu M. A. Tribological properties of  $\text{MoS}_2$  and  $\text{CaF}_2$  particles as grease additives on the performance of block-on-ring surface contact // Tribology International. 2022. Vol. 168. 107433. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107433.
11. Корнеев С. В., Лагунов В. Б., Мичник Б. Х. [и др.]. О критерии предельного состояния смазочного материала для пары трения баббит-сталь // Трение и износ. 1986. № 2. С. 342.
12. Матвеевский Р. М., Буяновский И. А., Багинский В. В. К оценке критических температур смазочных материалов при трении в режиме граничной смазки // Машиноведение. 1980. С. 119.
13. Буяновский И. А. Температурно-кинетический метод оценки температурных пределов работоспособности смазоч-

ных материалов при тяжелых режимах граничной смазки // Трение и износ. 1993. № 1. С. 127.

14. Жилко В. Н., Буяновский И. А., Лисенков Ю. Г. О связи между температурной стойкостью моторных масел и их противозносными свойствами // Трение и износ. 1983. № 4. С. 724.

**КОРНЕЕВ Сергей Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, г. Омск; профессор кафедры «Химия и химическая технология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.  
SPIN-код: 7617-5239

ORCID: 0000-0002-7243-1841

Адрес для переписки: svkorneev51@mail.ru

**ПАШУКЕВИЧ София Вячеславовна**, аспирант гр. Ма-202 кафедры «Химия и химическая технология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5626-7085

ORCID: 0000-0002-8111-4725

Адрес для переписки: sofia96@bk.ru

#### Для цитирования

Корнеев С. В., Пашукевич С. В. Влияние гранулометрического состава дисульфида молибдена на смазывание подшипников качения // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 13–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-13-18.

Статья поступила в редакцию 16.03.2023 г.

© С. В. Корнеев, С. В. Пашукевич

UDC 621.9.048.6:621.794

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-13-18

**S. V. KORNEEV<sup>1, 2</sup>**  
**S. V. PASHUKEVICH<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Siberian State Automobile  
and Road University,  
Omsk, Russia

<sup>2</sup> Omsk State  
Technical University,  
Omsk, Russia

## THE INFLUENCE OF GRANULOMETRIC COMPOSITION OF MOLYBDENUM DISULFIDE ON LUBRICATION OF ROLLING BEARINGS

In the work, laboratory tests are carried out to assess the wear of rolling bearings on the SMC-2 friction machine, depending on the granulometric composition (up to 1 and up to 7 microns) and the concentration of molybdenum disulfide added to the base industrial oil I-GT-A-100 (I-50A), produced according to GOST 20799-2022. During the tests, numerical values of the wear condition of four bearings are obtained, the average value is indicated. The dependences of the concentration of molybdenum disulfide with a granulometric composition of up to 1 and up to 7 microns on the wear level and the average temperature of the bearing during the tests are determined.

**Keywords:** lubricants, rolling bearings, greases, molybdenum disulfide, granulometric composition, industrial oil.

#### References

1. Rykov E. V., Shtokal A. O., Govorun T. A. [et al.]. Issledovaniye stoykosti tverdogo smazochnogo pokrytiya na osnove disul'fida molibdena k fretting-iznosu v usloviyakh vibratsionnogo nagruzheniya [Investigation of the fretting resistance of molybdenum disulfide-based solid lubricant coatings under vibration loading conditions] // Naukoymkiye tekhnologii. *Science Intensive Technologies*. 2019. Vol. 20, no. 2. P. 40–47. (In Russ.).
2. Bojarska Z., Kopytowski J., Mazurkiewicz-Pawlicka M. [et al.]. Molybdenum disulfide-based hybrid materials as new

types of oil additives with enhanced tribological and rheological properties // Tribology International. 2021. Vol. 160. 106999. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.106999. (In Engl.).

3. Kumar R., Banga H. K., Singh H. [et al.]. An outline on modern day applications of solid lubricants // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 28. P. 1962–1967. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.558. (In Engl.).

4. Shchegol'kov A. V., Zakhivat M. M. A., Zemtsova N. V. [et al.]. Matematicheskoye opisaniye protsessa mekhanoaktivatsii MoS<sub>2</sub> i munt dlya motornogo topliva i masla [Mathematical description of the process of mechanical activation of MOS<sub>2</sub> and MWCNT for motor fuel and oil] // Nauka v tsentral'noy

Rossii. *Science in the Central Russia*. 2022. No. 3 (57). P. 103–110. (In Russ.).

5. Singh A., Chauhan P., Mamatha T. G. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 25. P. 586–591. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.245. (In Engl.).

6. Saidi M. Z., Akram H., Achak O. [et al.]. Effect of morphology and hydrophobization of MoS<sub>2</sub> microparticles on the stability of poly- $\alpha$ -olefins lubricants // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019. Vol. 572. P. 174–181. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.04.003. (In Engl.).

7. Antonova N. M., Shorkin V. S., Romashin S. N. [et al.]. Adgeziya vibratsionnogo mekhanokhimicheskogo tverdosmazochnogo pokrytiya MoS<sub>2</sub> [Adhesion of MoS<sub>2</sub> vibratory mechanochemical solid lubricant coating] // *Poverkhnost'. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniya*. 2019. No. 9. P. 67–74. (In Russ.).

8. Ivanov V. V., Popov S. I., Dontsov N. S. [et al.]. Vliyaniye vibratsionnykh tverdosmazochnykh pokrytiy na kachestvo poverkhnosti i ekspluatatsionnyye svoystva detaley transportnykh mashin [Influence of vibration solid lubricants coatings on surface quality and operational properties of transport machine parts] // *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Kuzbass State Technical University Journal*. 2019. No. 6 (136). P. 5–13. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-6-5-13. (In Russ.).

9. Kim K. K., Kolesova A. V. Modelirovaniye kharakteristik skol'zyashchego kontakta [Modeling contact slider performance] // *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy. Bulletin of Scientific Research Results*. 2020. No. 2. P. 60–76. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-2-60-76. (In Russ.).

10. Baş H., Özen O., Beşirbeyoğlu M. A. Tribological properties of MoS<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> particles as grease additives on the performance of block-on-ring surface contact // *Tribology International*. 2022. Vol. 168. 107433. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107433. (In Engl.).

11. Korneyev S. V., Lagunov V. B., Michnik B. Kh. [et al.]. O kriterii predel'nogo sostoyaniya smazochnogo materiala dlya pary treniya babbitt-stal' [On the criteria for the limiting state of a lubricant for pairs of babbitt-steel] // *Treniye i iznos. Journal of Friction and Wear*. 1986. No. 2. P. 342. (In Russ.).

12. Matveyevskiy R. M., Buyanovskiy I. A., Baginskiy V. V. K otsenke kriticheskikh temperatur smazochnykh materialov

pri trenii v rezhime granichnoy smazki [To estimation of critical temperatures of lubricants in friction under boundary lubrication regime] // *Mashinovedeniye. Mechanical Engineering*. 1980. P. 119. (In Russ.).

13. Buyanovskiy I. A. Temperaturno-kineticheskiy metod otsenki temperaturnykh predelov rabotosposobnosti smazochnykh materialov pri tyazhelykh rezhimakh granichnoy smazki [Temperature-kinetic method for estimating the temperature limits of lubricant serviceability under heavy boundary lubrication modes] // *Treniye i iznos. Journal of Friction and Wear*. 1993. No. 1. P. 127. (In Russ.).

14. Zhilko V. N., Buyanovskiy I. A., Lisenkov Yu. G. O svyazi mezhdou temperaturnoy stoykost'yu motornykh masel i ikh protivoznosnymi svoystvami [On the relationship between the temperature resistance of engine oils and their anti-wear properties] // *Treniye i iznos. Journal of Friction and Wear*. 1983. No. 4. P. 724. (In Russ.).

---

**KORNEEV Sergey Vasilyevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Automation and Power Engineering Department, Siberian State Automobile and Road University, Omsk; Professor of Chemistry and Chemical Technology Department, Omsk State Technical University Omsk (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 7617-5239

ORCID: 0000-0002-7243-1841

Correspondence address: svkorneev51@mail.ru

**PASHUKEVICH Sofiya Vyacheslavovna**, Graduate Student gr. Ma-202 of Chemistry and Chemical Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 5626-7085

ORCID: 0000-0002-8111-4725

Correspondence address: sofia96@bk.ru

#### For citations

Korneev S. V., Pashukevich S. V. The influence of granulometric composition of molybdenum disulfide on lubrication of rolling bearings // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 13–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-13-18.

Received March 16, 2023.

© S. V. Korneev, S. V. Pashukevich

## БИКУБИЧЕСКАЯ ЛЕНТОЧНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

Бикубической лентой называют вытянутую вдоль оси  $Ox$  поверхность постоянной ширины, образованную набором прямоугольных в плане бикубических порций, соединенных между собой с гладкостью  $C^1$  (непрерывность градиента между порциями) или  $C^2$  (непрерывность кривизны). Каждая порция ограничена кубическими параболой, лежащими в вертикальных плоскостях  $x = \text{const}$ ,  $y = \text{const}$ . В статье представлены алгоритмы расчета бикубической ленты, основанные на использовании уравнений граничных кривых в качестве основных граничных условий. В качестве дополнительных граничных условий принимаются условия «плоские углы». Предлагаемый подход позволяет уменьшить размер характеристической матрицы системы линейных уравнений относительно коэффициентов, входящих в уравнения бикубических порций. Например, расчет 16 коэффициентов уравнения бикубической порции, проходящей через фиксированные граничные кривые, сводится к решению системы четырех линейных уравнений. Сформулированы (в виде теорем) критерии гладкого соединения бикубических порций. В теореме 1 сформулированы и доказаны условия непрерывности градиента. Теорема 2 содержит условия непрерывности кривизны. Представлены примеры расчета и визуализации  $C^1$  и  $C^2$ -гладких ленточных поверхностей, состоящих из двух или трех бикубических порций.

**Ключевые слова:** бикубическая порция, кубическая парабола, условия гладкости, градиент, плоские углы, закрепленные концы.

**Введение.** Бикубической ленточной поверхностью (бикубической лентой) называют вытянутую вдоль оси  $Ox$  поверхность постоянной ширины, образованную набором прямоугольных в плане бикубических порций (сегментов)  $ABCD$ ,  $BMNC$ ,  $MKLN$ , ..., соединенных между собой по наперед заданным поперечным швам  $BC$ ,  $MN$ , ... с гладкостью  $C^1$  или  $C^2$  (рис. 1). Гладкость  $C^1$  означает непрерывное изменение градиента (отсутствие изломов на поверхности ленты). Гладкость  $C^2$  означает непрерывное изменение кривизны поверхности. Иными словами, бикубическая лента — это прямоугольная в плане, вытянутая вдоль оси  $Ox$  кусочно-гладкая поверхность, проходящая через наперед заданные поперечные направляющие  $AD$ ,  $BC$ ,  $MN$ ,  $KL$ , ..., лежащие в плоскостях  $x = \text{const}$ . В качестве поперечных направляющих и продольных границ используются сегменты кубических парабол. Некоторые направляющие могут вырождаться в прямые линии (например, отрезок  $MN$  на рис. 1).

Порции ленты описываются бикубическими уравнениями [1, 2]:

$$F_{ABCD}(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} (x - x_0)^3 (y - y_0)^3, \quad x \in [x_0, x_1], \quad (1)$$

$$F_{BMNC}(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 b_{ij} (x - x_1)^3 (y - y_0)^3, \quad x \in [x_1, x_2], \quad (2)$$

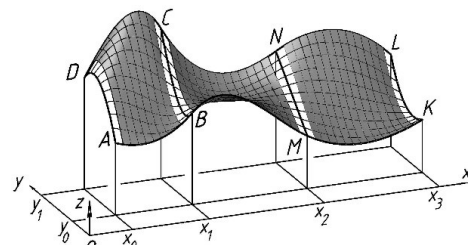


Рис. 1. Бикубическая лента

$$F_{MKLN}(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 c_{ij} (x - x_2)^3 (y - y_0)^3, \quad x \in [x_2, x_3], \quad (3)$$

.....

Диапазон изменения ординаты  $y \in [y_0, y_1]$  одинаков для всех порций. Количество порций может быть любым.

**Постановка задачи.** В декартовой системе координат  $Oxyz$  зафиксирован набор поперечных направляющих (кубических парабол)  $AD$ ,  $BC$ ,  $MN$ ,  $KL$ , ... (рис. 2). Продольные границы формируются с учетом заданных граничных условий. Требуется найти уравнения (1), (2), (3), ... бикубических порций  $ABCD$ ,  $BMNC$ ,  $MKLN$ , ..., удовлетворяющих заданным граничным условиям и условиям гладкости.

**Бикубическая порция.** На плоскости  $Oxy$  декартовой системы координат  $Oxyz$  отмечена прямо-

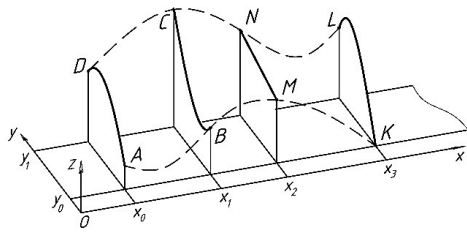


Рис. 2. Поперечные направляющие бикубической ленты

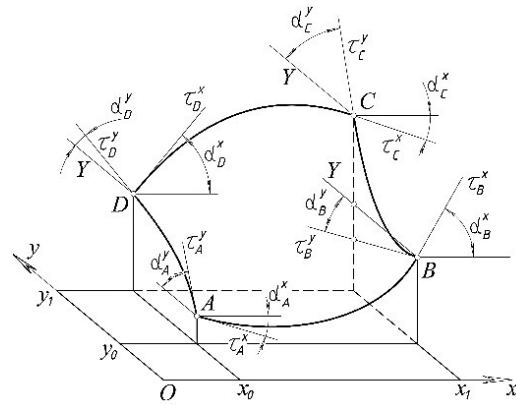


Рис. 3. Граничные условия

угольная ячейка  $h_x \times h_y$ , где  $h_x = x_1 - x_0$ ,  $h_y = y_1 - y_0$  (рис. 3). Указаны угловые точки  $A(x_0, y_0, z_A)$ ,  $B(x_1, y_0$

$z_B)$ ,  $C(x_1, y_1, z_C)$ ,  $D(x_0, y_1, z_D)$ . Даны уравнения граничных кривых:

$$\begin{aligned} AB &= z_{AB}(x) = \alpha_{AB} + \beta_{AB}(x - x_0) + \gamma_{AB}(x - x_0)^2 + \delta_{AB}(x - x_0)^3, \quad x \in [x_0, x_1], \\ AD &= z_{AD}(y) = \alpha_{AD} + \beta_{AD}(y - y_0) + \gamma_{AD}(y - y_0)^2 + \delta_{AD}(y - y_0)^3, \quad y \in [y_0, y_1], \\ BC &= z_{BC}(y) = \alpha_{BC} + \beta_{BC}(y - y_0) + \gamma_{BC}(y - y_0)^2 + \delta_{BC}(y - y_0)^3, \quad y \in [y_0, y_1], \\ DC &= z_{DC}(x) = \alpha_{DC} + \beta_{DC}(x - x_0) + \gamma_{DC}(x - x_0)^2 + \delta_{DC}(x - x_0)^3, \quad x \in [x_0, x_1]. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь и далее свободный член уравнения кубической параболы обозначен буквой  $\alpha$ , а коэффициенты при возрастающих степенях аргумента — буквами  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  соответственно. В подстрочном индексе указаны граничные точки соответствующей пара-

болы. Требуется найти уравнение бикубической поверхности (порции)  $ABCD$ , «натянутой» на заданные граничные кривые.

Уравнение (1) бикубической порции  $ABCD$  в развернутой форме имеет вид

$$\begin{aligned} F_{ABCD}(x, y) = z &= a_{00} + a_{01}(y - y_0) + a_{02}(y - y_0)^2 + a_{03}(y - y_0)^3 + \\ &+ [a_{10} + a_{11}(y - y_0) + a_{12}(y - y_0)^2 + a_{13}(y - y_0)^3](x - x_0) + \\ &+ [a_{20} + a_{21}(y - y_0) + a_{22}(y - y_0)^2 + a_{23}(y - y_0)^3](x - x_0)^2 + \\ &+ [a_{30} + a_{31}(y - y_0) + a_{32}(y - y_0)^2 + a_{33}(y - y_0)^3](x - x_0)^3; \quad x \in [x_0, x_1], y \in [y_0, y_1]. \end{aligned} \quad (5)$$

Положив  $y = y_0$ , выделяем из (5) уравнение граничной кривой  $AB$ :

$$z_{AB}(x) = a_{00} + a_{10}(x - x_0) + a_{20}(x - x_0)^2 + a_{30}(x - x_0)^3, \quad x \in [x_0, x_1]. \quad (6)$$

Приравнявая коэффициенты, входящие в первое уравнение из (4), и коэффициенты, входящие в уравнение (6), получаем:

$$\begin{aligned} a_{00} &= \alpha_{AB}, & a_{10} &= \beta_{AB}, \\ a_{20} &= \gamma_{AB}, & a_{30} &= \delta_{AB}. \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогичным образом, положив  $x = x_0$ , выделяем из (5) уравнение граничной кривой  $AD$  и приравниваем коэффициенты при одинаковых степенях переменной  $y$ :

$$a_{01} = \beta_{AD}, \quad a_{02} = \gamma_{AD}, \quad a_{03} = \delta_{AD}. \quad (8)$$

Подставляя в (5)  $x = x_1$ , получаем уравнение граничной кривой  $BC$ :

$$\begin{aligned} z_{BC}(y) &= (a_{00} + a_{10}h_x + a_{20}h_x^2 + a_{30}h_x^3) + \\ &+ (a_{01} + a_{11}h_x + a_{21}h_x^2 + a_{31}h_x^3)(y - y_0) + \\ &+ (a_{02} + a_{12}h_x + a_{22}h_x^2 + a_{32}h_x^3)(y - y_0)^2 + \\ &+ (a_{03} + a_{13}h_x + a_{23}h_x^2 + a_{33}h_x^3)(y - y_0)^3. \end{aligned} \quad (9)$$

Свободный член этого уравнения известен из (7). Приравнявая остальные коэффициенты уравнения (9) заданным коэффициентам граничной кривой  $BC$  (третье уравнение из (4)) и учитывая (8), получаем:

$$\begin{aligned} a_{11}h_x + a_{21}h_x^2 + a_{31}h_x^3 &= \beta_{BC} - \beta_{AD}, \\ a_{12}h_x + a_{22}h_x^2 + a_{32}h_x^3 &= \gamma_{BC} - \gamma_{AD}, \\ a_{13}h_x + a_{23}h_x^2 + a_{33}h_x^3 &= \delta_{BC} - \delta_{AD}. \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогичным образом, положив  $y = y_1$ , выделяем из (5) уравнение граничной кривой  $DC$  и, учитывая (7), (8), приравниваем коэффициенты при одинаковых степенях переменной  $x$ :

$$\begin{aligned} a_{11}h_y + a_{12}h_y^2 + a_{13}h_y^3 &= \beta_{DC} - \beta_{AB}, \\ a_{21}h_y + a_{22}h_y^2 + a_{23}h_y^3 &= \gamma_{DC} - \gamma_{AB}, \\ a_{31}h_y + a_{32}h_y^2 + a_{33}h_y^3 &= \delta_{DC} - \delta_{AB}. \end{aligned} \quad (11)$$

Можно показать, что любое из шести уравнений (10), (11) является следствием пяти остальных, поэтому одно из уравнений (например, последнее уравнение из (11)) надо исключить из рассмотрения. Получаем пять линейно независимых уравнений (10), (11), которые содержат девять неизвестных величин  $\{a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, a_{33}\}$ . Для их определения следует добавить четыре граничных условия.

В качестве дополнительных граничных условий могут быть приняты условия «плоские углы»: равенство нулю первых смешанных производных функции (5) в угловых точках конструируемой бикубической порции [3, 4]. Дифференцируя (5) и приравнявая нулю первые смешанные производные, получаем условия плоских углов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}(x_0, y_0) &= a_{11} = 0, \\ \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}(x_1, y_0) &= 2a_{21} + 3h_x a_{31} = 0, \\ \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}(x_1, y_1) &= 4a_{22} + 6h_y a_{23} + 6h_x a_{32} + 9h_x h_y a_{33} = 0, \\ \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}(x_0, y_1) &= 2a_{12} + 3h_y a_{13} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Выполнив некоторые алгебраические преобразования, из (10), (11), (12) получаем (с учетом  $a_{11} = 0$ ):

$$\begin{aligned} a_{12} &= -\frac{3}{h_y^2}(\beta_{AB} - \beta_{DC}), \quad a_{13} = \frac{2}{h_y^3}(\beta_{AB} - \beta_{DC}), \\ a_{21} &= -\frac{3}{h_x^2}(\beta_{AD} - \beta_{BC}), \quad a_{31} = \frac{2}{h_x^3}(\beta_{AD} - \beta_{BC}). \end{aligned} \quad (13)$$

Учитывая (13), система уравнений (10), (11), (12) сокращается до четырех уравнений относительно неизвестных коэффициентов  $a_{22}, a_{23}, a_{32}, a_{33}$ :

$$\begin{aligned} a_{22}h_x^2 + a_{32}h_x^3 &= \gamma_{BC} - \gamma_{AD} - a_{12}h_x, \\ a_{23}h_x^2 + a_{33}h_x^3 &= \delta_{BC} - \delta_{AD} - a_{13}h_x, \\ a_{22}h_y^2 + a_{23}h_y^3 &= \gamma_{DC} - \gamma_{AB} - a_{21}h_y, \\ 4a_{22} + 6a_{23}h_y + 6a_{32}h_x + 9a_{33}h_x h_y &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Уравнения (7), (8), (13), (14) позволяют определить все коэффициенты, входящие в уравнение (1) бикубической порции  $ABCD$ , заданной своими границами. Комплекс этих уравнений представляет собой вычислительный алгоритм, эквивалентный решению системы 16 линейных уравнений относительно 16 неизвестных коэффициентов уравнения (3) искомой бикубической порции [5].

Если бикубическая порция задана угловыми точками  $A, B, C, D$  и градиентами (углами наклона касательных в угловых точках по осям  $Ox, Oy$ ), то уравнения (4) границ порции определяются простым расчетом [6].

Например, если заданы углы наклона касательных  $\alpha_A^x, \alpha_B^x$  в конечных точках граничной кривой  $AB$  (рис. 3), то коэффициенты  $\gamma_{AB}, \delta_{AB}$ , входящие в уравнение этой кривой, вычисляются из системы уравнений

$$\begin{aligned} \alpha_{AB} + \beta_{AB}h_x + \gamma_{AB}h_x^2 + \delta_{AB}h_x^3 &= z_B, \\ \beta_{AB} + 2\gamma_{AB}h_x + 3\delta_{AB}h_x^2 &= tg\alpha_B^x, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\alpha_{AB} = z_A, \beta_{AB} = tg\alpha_A^x$ . Уравнения остальных границ определяются аналогичным образом.

**Пример 1.** Даны координаты угловых точек  $A(0; 0; 2,5), B(10; 0; 5), C(10; 10; 12,5), D(0, 10, 7,5)$ . В угловых точках зафиксированы градиенты (рис. 3):

$$\begin{aligned} tg\alpha_A^x &= -0,4; \quad tg\alpha_A^y = 1,7; \quad tg\alpha_B^x = 0,5; \quad tg\alpha_B^y = -1; \\ tg\alpha_C^x &= 0; \quad tg\alpha_C^y = 1,7; \quad tg\alpha_D^x = 1,7; \quad tg\alpha_D^y = -1. \end{aligned}$$

Дополнительно принимаются условия плоских углов (равенство нулю первых смешанных производных в углах порции). Требуется сформировать бикубическую поверхность (5), удовлетворяющую заданным граничным условиям.

**Решение.** Подставляя в (15) граничные условия и значения  $h_x = h_y = 10$ , находим коэффициенты  $\alpha_{AB} = 2,5; \beta_{AB} = -0,4; \gamma_{AB} = 0,105; \delta_{AB} = -0,004$  уравнения граничной кривой  $AB$ . Аналогичным образом, вычисляя коэффициенты уравнений граничных кривых  $AD, BC$  и  $DC$ , получаем:

$$\begin{aligned} z_{AB}(x) &= 2,5 - 0,4x + 0,105x^2 - 0,004x^3, \\ z_{BC}(y) &= 5 - y + 0,255y^2 - 0,008y^3, \\ z_{AD}(y) &= 2,5 + 1,7y - 0,09y^2 - 0,003y^3, \\ z_{DC}(x) &= 7,5 + 1,7x - 0,19x^2 + 0,007x^3. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя коэффициенты уравнений (16) в выражения (13), получаем:

$$\begin{aligned} a_{12} &= 0,063; \quad a_{13} = -0,0042; \\ a_{21} &= -0,081; \quad a_{31} = 0,0054. \end{aligned}$$

Система уравнений (14) приобретает вид

$$\begin{aligned} 100a_{22} + 1000a_{32} &= -0,285, \\ 100a_{23} + 1000a_{33} &= 0,037, \\ 100a_{22} + 1000a_{23} &= 0,515, \\ 4a_{22} + 60a_{23} + 60a_{32} + 900a_{33} &= 0. \end{aligned}$$

Решив эту систему уравнений, получаем:

$$\begin{aligned} a_{22} &= -0,00075; \quad a_{32} = -0,00021; \\ a_{23} &= 0,00059; \quad a_{33} = -0,000022. \end{aligned}$$

Из (7), (8) находим остальные коэффициенты, входящие в уравнение (5):

$$\begin{aligned} a_{00} &= \alpha_{AB} = 2,5; \quad a_{10} = \beta_{AB} = -0,4; \\ a_{20} &= \gamma_{AB} = 0,105; \quad a_{30} = \delta_{AB} = -0,004; \\ a_{01} &= \beta_{AD} = 1,7; \quad a_{02} = \gamma_{AD} = -0,09; \\ a_{03} &= \delta_{AD} = -0,003. \end{aligned}$$

Все 16 коэффициентов (с учетом  $a_{11} = 0$ ) уравнения (5) бикубической порции  $ABCD$  определены. На рис. 4 представлена сетка образующих (кубических парабол), построенная согласно (5). Например, в сечении поверхности плоскостью  $y=3$  получаем продольную образующую

$$\begin{aligned} z(x) &= 6,709 + 0,0536x - \\ &- 0,12882x^2 + 0,009716x^3. \end{aligned} \quad (17)$$

Дифференцируя (17) и положив  $x=10$ , получаем:  $dz/dx=0,392; d^2z/dx^2=0,32532$ . Эти величины будут использованы в примере 2.

**$C^1$ -гладкое соединение бикубических сегментов.** Требуется соединить «левую» и «правую» бикубические порции  $ABCD$  и  $BMNC$  по шву  $BC$ . Покажем, что гладкость  $C^1$  достигается при равенстве первых производных в стыковых точках  $B, C$  соединяемых порций.

**Теорема 1.** Если у «левой» и «правой» бикубических порций  $F_{лев}(x, y)$  и  $F_{прав}(x, y)$  имеется общий шов  $BC$ , причем в точках  $B, C$  совпадают частные производные

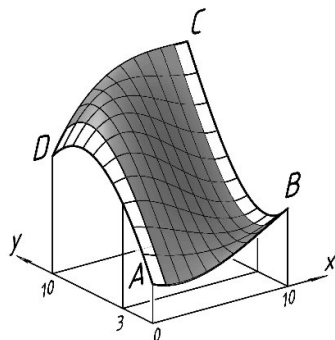


Рис. 4. Бикубический сегмент

$$\frac{\partial F_{лев}}{\partial x} \Big|_B = \frac{\partial F_{прав}}{\partial x} \Big|_B, \quad \frac{\partial F_{лев}}{\partial x} \Big|_C = \frac{\partial F_{прав}}{\partial x} \Big|_C,$$

а также совпадают первые смешанные производные

$$\frac{\partial^2 F_{лев}}{\partial x \partial y} \Big|_B = \frac{\partial^2 F_{прав}}{\partial x \partial y} \Big|_B, \quad \frac{\partial^2 F_{лев}}{\partial x \partial y} \Big|_C = \frac{\partial^2 F_{прав}}{\partial x \partial y} \Big|_C,$$

то в любой точке шва BC выполняется равенство  $\frac{\partial F_{лев}}{\partial x} = \frac{\partial F_{прав}}{\partial x}$ .

**Доказательство.** Согласно (5), производную  $\frac{\partial F_{лев}}{\partial x}$  вдоль линии шва BC можно записать в виде кубической функции

$$\psi(y) = \frac{\partial F_{лев}}{\partial x} = a_{лев} + b_{лев}y + c_{лев}y^2 + d_{лев}y^3.$$

Функция  $\psi(y)$  однозначно определена своими значениями  $\frac{\partial F_{лев}}{\partial x} \Big|_B, \frac{\partial F_{лев}}{\partial x} \Big|_C$  и производными  $\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_B = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial F_{лев}}{\partial x} \right) \Big|_B = \frac{\partial^2 F_{лев}}{\partial x \partial y} \Big|_B, \frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_C = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial F_{лев}}{\partial x} \right) \Big|_C = \frac{\partial^2 F_{лев}}{\partial x \partial y} \Big|_C$  в крайних точках шва BC.

Производную  $\frac{\partial F_{прав}}{\partial x}$  вдоль линии шва BC также можно записать в виде кубической функции

$$\chi(y) = \frac{\partial F_{прав}}{\partial x} = a_{прав} + b_{прав}y + c_{прав}y^2 + d_{прав}y^3.$$

Эта функция также однозначно определена своими значениями  $\frac{\partial F_{прав}}{\partial x} \Big|_B, \frac{\partial F_{прав}}{\partial x} \Big|_C$  и производными  $\frac{\partial \chi}{\partial y} \Big|_B = \frac{\partial^2 F_{прав}}{\partial x \partial y} \Big|_B, \frac{\partial \chi}{\partial y} \Big|_C = \frac{\partial^2 F_{прав}}{\partial x \partial y} \Big|_C$  в крайних точках шва BC. Согласно условию теоремы, значения функций  $\psi(y), \chi(y)$  и значения их смешанных производных в точках B, C совпадают:  $\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_B = \frac{\partial \chi}{\partial y} \Big|_B, \frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_C = \frac{\partial \chi}{\partial y} \Big|_C$ .

Следовательно, вдоль линии шва BC функции  $\psi(y), \chi(y)$  совпадают. Это означает, что в любой точке шва соединяемые бикубические порции имеют общую касательную, параллельную фронтальной плоскости Ozx.

Кроме этого, в любой точке шва BC существует касательная к линии шва. Эта касательная также является общей для соединяемых порций. Две общие касательные в любой точке шва определяют общую касательную плоскость, что доказывает  $C^1$  — гладкое соединение бикубических порций.

**Пример 2.** К порции бикубической поверхности ABCD, рассмотренной в примере 1, требуется присоединить (с гладкостью  $C^1$ ) бикубическую порцию VMNC с угловыми точками  $M(25; 0; 0), N(25; 10; 7,5)$  и фиксированными градиентами в этих точках  $\text{tg}\alpha_M^x = -0,6; \text{tg}\alpha_M^y = 2; \text{tg}\alpha_N^x = 1; \text{tg}\alpha_N^y = -1,6$ .

**Решение.** Уравнение (2) бикубической порции VMNC в развернутой форме имеет вид

$$F_{VMNC}(x, y) = z = b_{00} + b_{01}(y - y_0) + b_{02}(y - y_0)^2 + b_{03}(y - y_0)^3 + [b_{10} + b_{11}(y - y_0) + b_{12}(y - y_0)^2 + b_{13}(y - y_0)^3](x - x_1) + [b_{20} + b_{21}(y - y_0) + b_{22}(y - y_0)^2 + b_{23}(y - y_0)^3](x - x_1)^2 + [b_{30} + b_{31}(y - y_0) + b_{32}(y - y_0)^2 + b_{33}(y - y_0)^3](x - x_1)^3; x \in [x_1, x_2], y \in [y_0, y_1]. \quad (18)$$

Согласно теореме 1, для  $C^1$ -гладкого соединения сегментов по шву BC надо обеспечить равенство первых производных в стыковых точках B, C. Следовательно, для «правой» порции VMNC в точках B, C должны быть выполнены условия:

$$\text{tg}\alpha_B^x = 0,5; \quad \text{tg}\alpha_C^x = 0; \quad \frac{\partial^2 F_{VMNC}}{\partial x \partial y} \Big|_B = \frac{\partial^2 F_{VMNC}}{\partial x \partial y} \Big|_C = 0 \quad (19)$$

(см. пример 1).

Дополнительно примем условия «плоские углы» в точках M, N:

$$\frac{\partial^2 F_{VMNC}}{\partial x \partial y} \Big|_M = \frac{\partial^2 F_{VMNC}}{\partial x \partial y} \Big|_N = 0,$$

что позволяет использовать алгоритм (7), (8), (13), (14) для расчета «правой» порции.

Согласно (15), находим уравнения продольных границ VM, CN и направляющей параболы MN:

$$\begin{aligned} BM &= z_{BM}(x) = 5 + 0,5(x - x_1) - \\ &- 0,093(3)(x - x_1)^2 + 0,002518(518)(x - x_1)^3, \\ CN &= z_{CN}(x) = 12,5 - 0,13(3)(x - x_1)^2 + \\ &+ 0,0074(074)(x - x_1)^3, \\ MN &= z_{MN}(y) = 2y - 0,015y^2 - 0,011y^3. \end{aligned} \quad (20)$$

Уравнение шва BC имеет вид  $BC = z_{BC}(y) = 5 - y + 0,255y^2 - 0,008y^3$  (см. пример 1).

Для расчета коэффициентов уравнения (18) используем вычислительный алгоритм (7), (8), (13), (14), где вместо обозначений  $a_{ij}$  приняты обозначения  $b_{ij}$ , а также соответствующим образом изменены обозначения граничных кривых (обозначение AB заменяем на MN, и так далее). Выражения (13) приобретают для правого сегмента следующий вид:

$$\begin{aligned} b_{12} &= -\frac{3}{h_y}(\beta_{BM} - \beta_{CN}), \quad b_{13} = \frac{2}{h_y^3}(\beta_{BM} - \beta_{CN}), \\ b_{21} &= -\frac{3}{h_x}(\beta_{BC} - \beta_{MN}), \quad b_{31} = \frac{2}{h_x^3}(\beta_{BC} - \beta_{MN}). \end{aligned}$$

Подставляя сюда  $\beta_{BM} = 0,5; \beta_{CN} = 0; \beta_{BC} = -1$ , получаем:

$$\begin{aligned} b_{12} &= -0,015; \quad b_{13} = 0,001; \\ b_{21} &= 0,04; \quad b_{31} = -0,0017(7). \end{aligned}$$

Система уравнений (14) для порции VMNC приобретает вид:

$$\begin{aligned} b_{22}h_x^2 + b_{32}h_x^3 &= \gamma_{MN} - \gamma_{BC} - b_{12}h_x, \\ b_{23}h_x^2 + b_{33}h_x^3 &= \delta_{MN} - \delta_{BC} - b_{13}h_x, \\ b_{22}h_y^2 + b_{23}h_y^3 &= \gamma_{CN} - \gamma_{BM} - b_{21}h_y, \\ 4b_{22} + 6b_{23}h_y + 6b_{32}h_x + 9b_{33}h_xh_y &= 0. \end{aligned}$$

Подставляем сюда рассчитанные значения  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{21}$ ,  $b_{31}$ , а также значения

$$\begin{aligned} \gamma_{MN} &= -0,015; \quad \gamma_{BC} = 0,255; \quad \delta_{MN} = -0,011; \\ \delta_{BC} &= -0,008, \quad h_x = 15, \quad h_y = 10. \end{aligned}$$

Решив полученную систему уравнений, находим:

$$\begin{aligned} b_{22} &= -0,0048; \quad b_{32} = 0,000306(6); \\ b_{23} &= 0,00004; \quad b_{33} = -0,000008. \end{aligned}$$

Из выражений (7), (8) применительно к порции  $BMNC$  получаем:

$$\begin{aligned} b_{00} &= \alpha_{BM} = 5; \quad b_{10} = \beta_{BM} = 0,5; \\ b_{20} &= \gamma_{BM} = -0,093(3); \quad b_{30} = \delta_{BM} = 0,002518 \quad (518); \\ b_{01} &= \beta_{BC} = -1; \quad b_{02} = \gamma_{BC} = 0,255; \quad b_{03} = \delta_{BC} = -0,008. \end{aligned}$$

Согласно условию «плоские углы», имеем  $b_{11} = 0$ .

Все коэффициенты уравнения (18) бикубической порции  $BMNC$  определены. На рис. 5 представлена лента, построенная согласно (18). Бикубические порции  $ABCD$  и  $BMNC$  соединены с гладкостью  $C^1$ . В стыковой точке  $C$  получен неестественно уплощенный участок поверхности вследствие того, что в точке  $C$  задана горизонтальная касательная ( $\text{tg}\alpha_C^x = 0$ ). Этот недостаток будет исправлен в примере 3.

**Проверка.** Положив в (17)  $y = 3$ , получаем продольную образующую «правой» порции

$$\begin{aligned} z &= 4,079 + 0,392(x - 10) - 0,015453(x - 10)^2 - \\ &\quad - 0,000270815(x - 10)^3. \end{aligned} \quad (21)$$

Дифференцируя (21) и положив  $x = 10$ , получаем:  $dz/dx = 0,392$ . В конечной точке образующей (17) «левой» порции была получена такая же величина (см. пример 1). Следовательно, образующие (17) и (21) имеют общую касательную в точке их соединения (на линии шва  $BC$ ), что подтверждает гладкость  $C^1$  составной поверхности. Вторая производная функции (21) при  $x = 10$  равна  $d^2z/dx^2 = -0,03091$ , что отличается от значения  $d^2z/dx^2 = 0,21236$  для функции (17). Следовательно, на линии  $BC$  происходит скачкообразное изменение кривизны бикубической ленты.

**$C^2$ -гладкое соединение бикубических порций.** Для  $C^2$ -гладкого соединения бикубических порций по шву  $BC$  надо потребовать равенство первых и вторых производных от функций (5), (18) по переменным  $x, y$  в точках  $B, C$ .

**Теорема 2.** Если у «левой» и «правой» бикубических порций  $F_{лев}(x, y)$  и  $F_{прав}(x, y)$  имеется общий поперечный шов  $BC$ , причем в точках  $B, C$  совпадают первые и вторые частные производные

$$\frac{\partial F_{лев}}{\partial x} \Big|_B = \frac{\partial F_{прав}}{\partial x} \Big|_B, \quad \frac{\partial F_{лев}}{\partial x} \Big|_C = \frac{\partial F_{прав}}{\partial x} \Big|_C, \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 F_{лев}}{\partial x^2} \Big|_B = \frac{\partial^2 F_{прав}}{\partial x^2} \Big|_B, \quad \frac{\partial^2 F_{лев}}{\partial x^2} \Big|_C = \frac{\partial^2 F_{прав}}{\partial x^2} \Big|_C, \quad (23)$$

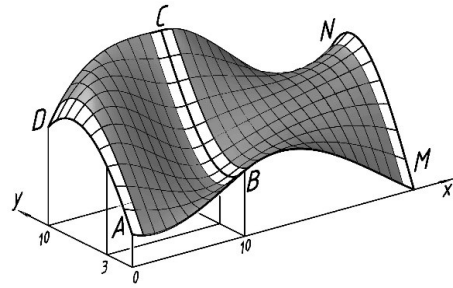


Рис. 5.  $C^1$ -гладкая лента (к примеру 2)

а также совпадают первые и вторые смешанные производные

$$\frac{\partial^2 F_{лев}}{\partial x \partial y} \Big|_B = \frac{\partial^2 F_{прав}}{\partial x \partial y} \Big|_B, \quad \frac{\partial^2 F_{лев}}{\partial x \partial y} \Big|_C = \frac{\partial^2 F_{прав}}{\partial x \partial y} \Big|_C, \quad (24)$$

$$\frac{\partial^4 F_{лев}}{\partial x^2 \partial y^2} \Big|_B = \frac{\partial^4 F_{прав}}{\partial x^2 \partial y^2} \Big|_B, \quad \frac{\partial^4 F_{лев}}{\partial x^2 \partial y^2} \Big|_C = \frac{\partial^4 F_{прав}}{\partial x^2 \partial y^2} \Big|_C, \quad (25)$$

то в любой точке шва выполняются равенства  $\frac{\partial F_{лев}}{\partial x} = \frac{\partial F_{прав}}{\partial x}, \frac{\partial^2 F_{лев}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 F_{прав}}{\partial x^2}$ . Это означает, что кривизна любой продольной образующей бикубической ленты изменяется непрерывно (без скачкообразного изменения в стыковых точках на линии шва). Доказательство теоремы 2 выполняется аналогично доказательству теоремы 1.

Пусть требуется сформировать двухсекционную  $C^2$ -гладкую бикубическую ленту с фиксированными поперечными направляющими  $AD, BC, MN$  (см. рис. 5). Согласно условию теоремы 2, продольная граница  $ABM$ , образованная кубическими параболлами  $AB$  и  $BM$ , должна быть  $C^2$ -гладкой составной кривой. Это же требование относится к продольной границе  $DCN$ . Рассмотрим условия  $C^2$ -гладкого соединения кубических парабол.

**Условия  $C^2$ -гладкости составной кубической кривой.** В вертикальной плоскости  $y = y_0$  декартовой системы координат  $Oxyz$  указаны точки  $A(x_0, y_0, z_0), B(x_1, y_0, z_1), M(x_2, y_0, z_2)$ . Через указанные точки требуется провести составную  $C^2$ -гладкую кривую, образованную кубическими параболлами  $\varphi_1(x) = AB$  и  $\varphi_2(x) = BM$ . В граничных точках  $A$  и  $M$  указаны углы наклона  $\alpha_A^x$  и  $\alpha_M^x$  касательных к конструируемой кривой («закрепленные концы»).

Условие  $C^2$ -гладкого соединения парабол  $\varphi_1(x)$  и  $\varphi_2(x)$  имеет вид [7]

$$\begin{aligned} h_{1x}S_0 + 2(h_{1x} + h_{2x})S_1 + h_{2x}S_2 &= \\ &= \frac{6(z_2 - z_1)}{h_{2x}} - \frac{6(z_1 - z_0)}{h_{1x}}, \end{aligned} \quad (26)$$

где  $S_0, S_1, S_2$  — значения вторых производных по переменной  $x$  функций  $z = \varphi_1(x), z = \varphi_2(x)$  в узлах  $A, B, M$ . Здесь использованы обозначения  $h_{1x} = x_1 - x_0, h_{2x} = x_2 - x_1$ .

Условие гладкости (26) должно быть дополнено условиями «закрепленные концы»:

$$\frac{z_1 - z_0}{h_{1x}} - \frac{h_{1x}}{3} S_0 - \frac{h_{1x}}{6} S_1 = \text{tg}\alpha_A^x,$$

$$\frac{z_2 - z_1}{h_{2x}} + \frac{h_{2x}}{3} S_2 + \frac{h_{2x}}{6} S_1 = \text{tg}\alpha_M^x. \quad (27)$$

Из системы уравнений (26), (27) находим значения  $S_0, S_1, S_2$  и подставляем в уравнения

$$\begin{aligned} \varphi_1(x) &= \frac{S_0(x_1 - x)^3 + S_1(x - x_0)^3}{6h_{1x}} + \\ &+ \left( \frac{z_0}{h_{1x}} - \frac{S_0 h_{1x}}{6} \right) (x_1 - x) + \left( \frac{z_1}{h_{1x}} - \frac{S_1 h_{1x}}{6} \right) (x - x_0), \\ &x \in [x_0, x_1], \\ \varphi_2(x) &= \frac{S_1(x_2 - x)^3 + S_2(x - x_1)^3}{6h_{2x}} + \\ &+ \left( \frac{z_1}{h_{2x}} - \frac{S_1 h_{2x}}{6} \right) (x_2 - x) + \left( \frac{z_2}{h_{2x}} - \frac{S_2 h_{2x}}{6} \right) (x - x_1), \\ &x \in [x_1, x_2]. \end{aligned} \quad (28)$$

Вычислительный алгоритм (26), (27), (28) позволяет найти уравнения сегментов  $C^2$ -гладкой кубической кривой с закрепленными концами. Этот алгоритм будет в дальнейшем использован для формирования продольных границ  $C^2$ -гладкой бикубической ленты. Если  $C^2$ -гладкая кубическая кривая формируется из  $n$  сегментов ( $n-1$  стыковых точек), то указанный алгоритм будет содержать  $n-1$  условий гладкости вида (24) и  $n$  уравнений вида (28).

**Расчет двухсекционной  $C^2$ -гладкой бикубической ленты.** Даны координаты узловых точек  $A, B, C, D, M, N$  и уравнения поперечных направляющих  $AD, BC, MN$  (см. рис. 5). В угловых точках  $A, D, M, N$  заданы продольные градиенты  $tga_A^x, tga_D^x, tga_M^x, tga_N^x$ . В этих же точках заданы граничные условия «плоские углы». Требуется найти уравнения (5), (18) бикубических порций  $ABCD, BMNC$ , соединенных по шву  $BC$  с гладкостью  $C^2$ .

**Шаг 1.** Используя алгоритм (26), (27), (28), находим уравнения кубических парабол  $AB$  и  $BM$ , соединенных в точке  $B$  с гладкостью  $C^2$ . Аналогичным образом находим уравнения кубических парабол  $DC$  и  $CN$ , соединенных в точке  $C$  с гладкостью  $C^2$ .

**Шаг 2.** Согласно (7), (8), вычисляем 14 коэффициентов уравнений (5), (18):

$$\begin{aligned} a_{00}, a_{10}, a_{20}, a_{30}, a_{01}, a_{02}, a_{03}, \\ b_{00}, b_{10}, b_{20}, b_{30}, b_{01}, b_{02}, b_{03}. \end{aligned}$$

**Шаг 3.** Составляем систему десяти линейно независимых уравнений вида (10), (11) относительно восемнадцати коэффициентов  $a_{ij}, b_{ij}$ :

$$\begin{aligned} a_{11}h_{1x} + a_{21}h_{1x}^2 + a_{31}h_{1x}^3 &= \beta_{BC} - \beta_{AD}, \\ a_{12}h_{1x} + a_{22}h_{1x}^2 + a_{32}h_{1x}^3 &= \gamma_{BC} - \gamma_{AD}, \\ a_{13}h_{1x} + a_{23}h_{1x}^2 + a_{33}h_{1x}^3 &= \delta_{BC} - \delta_{AD}, \\ a_{11}h_y + a_{12}h_y^2 + a_{13}h_y^3 &= \beta_{DC} - \beta_{AB}, \\ a_{21}h_y + a_{22}h_y^2 + a_{23}h_y^3 &= \gamma_{DC} - \gamma_{AB}, \\ b_{11}h_{2x} + b_{21}h_{2x}^2 + b_{31}h_{2x}^3 &= \beta_{MN} - \beta_{BC}, \\ b_{12}h_{2x} + b_{22}h_{2x}^2 + b_{32}h_{2x}^3 &= \gamma_{MN} - \gamma_{BC}, \\ b_{13}h_{2x} + b_{23}h_{2x}^2 + b_{33}h_{2x}^3 &= \delta_{MN} - \delta_{BC}, \\ b_{11}h_y + b_{12}h_y^2 + b_{13}h_y^3 &= \beta_{CN} - \beta_{BM}, \\ b_{21}h_y + b_{22}h_y^2 + b_{23}h_y^3 &= \gamma_{CN} - \gamma_{BM}. \end{aligned} \quad (29)$$

**Шаг 4.** Дифференцируя функции (5), (18), записываем граничные условия «плоские углы»:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F_{ABCD}}{\partial x \partial y} \Big|_A &= a_{11} = 0, \\ \frac{\partial^2 F_{ABCD}}{\partial x \partial y} \Big|_D &= 2a_{12} + 3h_y a_{13} = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F_{BMNC}}{\partial x \partial y} \Big|_M &= b_{11} + 2h_{2x} b_{21} + 3h_{2x}^2 b_{31} = 0, \\ \frac{\partial^2 F_{BMNC}}{\partial x \partial y} \Big|_N &= 2b_{12} + 3h_y b_{13} + 4h_{2x} b_{22} + \\ &+ 6h_{2x} h_y b_{23} + 6h_{2x}^2 b_{32} + 9h_{2x}^2 h_y b_{33} = 0. \end{aligned} \quad (30)$$

**Шаг 5.** Записываем условия  $C^2$ -гладкого соединения бикубических порций по шву  $BC$  (см. теорему 2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F_{ABCD}}{\partial x \partial y} \Big|_B &= \frac{\partial^2 F_{BMNC}}{\partial x \partial y} \Big|_B \Rightarrow \\ \Rightarrow a_{11} + 2h_{1x} a_{21} + 3h_{1x}^2 a_{31} &= b_{11}, \\ \frac{\partial^2 F_{ABCD}}{\partial x \partial y} \Big|_C &= \frac{\partial^2 F_{BMNC}}{\partial x \partial y} \Big|_C \Rightarrow \\ \Rightarrow 2a_{12} + 3h_y a_{13} + 4h_{1x} a_{22} + 6h_{1x} h_y a_{23} + \\ &+ 6h_{1x}^2 a_{32} + 9h_{1x}^2 h_y a_{33} = 2b_{12} + 3h_y b_{13}, \\ \frac{\partial^4 F_{ABCD}}{\partial x^2 \partial y^2} \Big|_B &= \frac{\partial^4 F_{BMNC}}{\partial x^2 \partial y^2} \Big|_B \Rightarrow a_{22} + 3h_{1x} a_{32} = b_{22}, \\ \frac{\partial^4 F_{ABCD}}{\partial x^2 \partial y^2} \Big|_C &= \frac{\partial^4 F_{BMNC}}{\partial x^2 \partial y^2} \Big|_C \Rightarrow a_{23} + 3h_{1x} a_{33} = b_{23}. \end{aligned} \quad (31)$$

Получена система 18 линейных уравнений (29), (30), (31) относительно 18 неизвестных коэффициентов, входящих в (5), (18). Остальные 14 коэффициентов определены непосредственным расчетом (см. шаг 2). Исключая из (29), (30), (31) коэффициент  $a_{11} = 0$ , получаем систему 17 уравнений. Комплекс этих уравнений представляет собой вычислительный алгоритм, эквивалентный решению системы 32 линейных уравнений относительно 32 неизвестных коэффициентов, входящих в уравнения (5), (18).

**Пример 3.** Требуется повысить гладкость бикубической ленты, рассмотренной в примере 2 (рис. 5), до степени  $C^2$ , сохранив поперечные направляющие

$$\begin{aligned} AD &= z_{AD}(y) = 2,5 + 1,7y - 0,09y^2 - 0,003y^3, \\ BC &= z_{BC}(y) = 5 - y + 0,255y^2 - 0,008y^3, \\ MN &= z_{MN}(y) = 2y - 0,015y^2 - 0,011y^3 \end{aligned}$$

и градиенты в угловых точках  $tga_A^x = -0,4$ ;  $tga_D^x = 1,7$ ;  $tga_M^x = -0,6$ ;  $tga_N^x = 1$ .

**Решение.** Согласно (26), (27), (28), находим уравнения сегментов продольной границы  $ABM$ :

$$\begin{aligned} AB &= z_{AB}(x) = 2,5 - 0,4x + 0,1285x^2 - 0,00635x^3 \\ &x \in [0, 10], \\ BM &= z_{BM}(x) = 5 + 0,265(x - 10) - \\ &- 0,062(x - 10)^2 + 0,001474074(x - 10)^3, \\ &x \in [10, 25]. \end{aligned}$$

Кубические параболы  $AB$  и  $BM$  соединены в точке  $B$  с гладкостью  $C^2$ . Аналогичным образом находим уравнения сегментов граничной кривой  $DCN$ , соединенные в точке  $C$  с гладкостью  $C^2$ :

$$\begin{aligned} DC &= z_{DC}(x) = 7,5 + 1,7x - 0,144x^2 + 0,0024x^3, \\ &x \in [0, 10], \\ CN &= z_{CN}(x) = 12,5 - 0,46(x - 10) - \\ &- 0,072(x - 10)^2 + 0,00536296(x - 10)^3, \\ &x \in [10, 25]. \end{aligned}$$

Согласно (7), (8), вычисляем семь коэффициентов, входящих в уравнения (5) бикубической порции  $ABCD$ :

$$\begin{aligned} a_{00} &= \alpha_{AB} = 2,5; \quad a_{10} = \beta_{AB} = -0,4; \\ a_{20} &= \gamma_{AB} = 0,1285; \quad a_{30} = \delta_{AB} = -0,00635; \\ a_{01} &= \beta_{AD} = 1,7; \quad a_{02} = \gamma_{AD} = -0,09; \\ a_{03} &= \delta_{AD} = -0,003. \end{aligned}$$

Аналогично находим семь коэффициентов уравнения (18) бикубической порции  $BMNC$ :

$$\begin{aligned} b_{00} &= \alpha_{BM} = 5; \quad b_{10} = \beta_{BM} = 0,265; \\ b_{20} &= \gamma_{BM} = -0,062; \quad b_{30} = \delta_{BM} = 0,001474074; \\ b_{01} &= \beta_{BC} = -1; \quad b_{02} = \gamma_{BC} = 0,255; \\ b_{03} &= \delta_{BC} = -0,008. \end{aligned}$$

Подставляем в (29), (30), (31) значения коэффициентов  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , а также  $h_1x = 10$ ,  $h_2x = 15$ ,  $h_y = 10$ . Решив полученную систему 18 уравнений относительно 18 неизвестных  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  находим:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 0; \quad a_{12} = 0,063; \quad a_{13} = -0,0042; \\ a_{21} &= -0,0687; \quad a_{22} = -0,001425; \\ a_{23} &= 0,000557; \quad a_{31} = 0,00417; \\ a_{32} &= -0,0001425; \quad a_{33} = -0,0000187, \\ b_{11} &= -0,123; \quad b_{12} = -0,00825; \\ b_{13} &= 0,00133; \quad b_{21} = 0,0564; \quad b_{22} = -0,0057; \\ b_{23} &= -0,000004; \quad b_{31} = -0,002324; \\ b_{32} &= 0,000336; \quad b_{33} = -0,00000653. \end{aligned}$$

Определены все 32 коэффициента уравнений (5), (18) бикубических порций  $ABCD$  и  $BMNC$ , соединенных с гладкостью  $C^2$ . На рис. 6 представлена сетка образующих  $C^2$ -гладкой бикубической ленты, построенная согласно (5) и (18).

**Проверка.** Положив в (1а)  $x_0 = 0$ ,  $y = 3$ , получаем продольную образующую «левой» порции:

$$z_{ABCD}(x) = 6,709 + 0,0536x - 0,075386x^2 + 0,0043726x^3, \quad x \in [0, 10]. \quad (32)$$

Дифференцируя (32), при  $x = 10$  находим:  $dz/dx = -0,14234$ ,  $d^2z/dx^2 = 0,111584$ . Аналогичным образом, положив в (18)  $x_1 = 10$ ,  $y = 3$ , получаем продольную образующую «правой» порции:

$$\begin{aligned} z_{BMNC}(x) &= 4,079 - 0,14234(x - 10) + \\ &+ 0,055792(x - 10)^2 - 0,00263965(x - 10)^3, \\ &x \in [10, 25]. \end{aligned} \quad (33)$$

Дифференцируя (33) и положив  $x = 10$ , получаем те же самые значения первой и второй производных. Следовательно, образующие (32) и (33) имеют общую касательную и одинаковую кривизну в точке их соединения на линии шва  $BC$ , что подтверждает  $C^2$ -гладкость бикубической ленты.

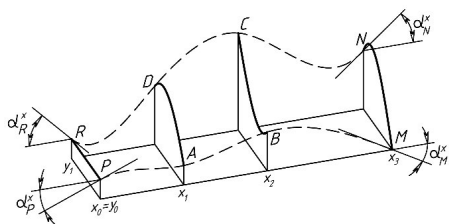


Рис. 7. Трехсекционная  $C^2$ -гладкая бикубическая лента (к примеру 4)

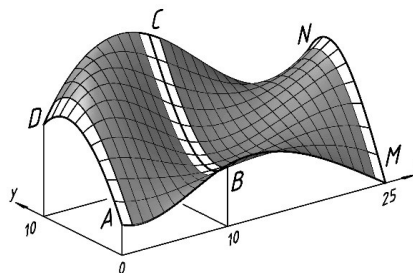


Рис. 6.  $C^2$ -гладкая лента (к примеру 3)

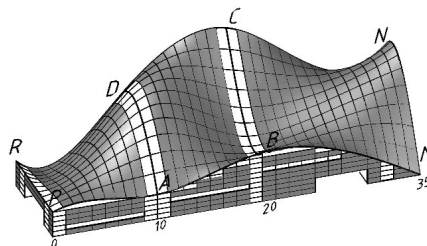
Обобщение на случай трех и более бикубических порций. Пусть требуется соединить  $n$  бикубических порций (с гладкостью  $C^2$ ). Для решения задачи требуется рассчитать  $16n$  коэффициентов, входящих в уравнения (1), (2), (3), ... соединяемых порций.

**Решение.** Находим уравнения продольных границ ленты, образованных составными  $C^2$ -гладкими  $n$ -секционными кубическими кривыми, используя алгоритм (26) ... (28). Указанный алгоритм содержит  $n-1$  условий гладкости вида (26).

Непосредственным вычислением по формулам вида (7), (8) находим  $7n$  коэффициентов, входящих в (1), (2), (3), ..., после чего составляем систему  $5n$  уравнений вида (29), содержащих остальные  $9n$  коэффициентов. Дополняем эту систему уравнений четырьмя граничными условиями вида (30) (плоские углы) и  $4(n-1)$  условиями гладкости вида (31). Получаем систему  $9n$  линейных уравнений относительно  $9n$  неизвестных коэффициентов. Совместно с ранее найденными  $7n$  коэффициентами получаем  $16n$  коэффициентов, входящих в искомые уравнения (1), (2), (3), ... соединяемых бикубических порций.

**Пример 4. Перекрытие свободной формы (архитектурный проект).** К двухсекционному перекрытию  $ABCD + BMNC$ , рассмотренному в примере 3, требуется присоединить входной портал  $PADR$  с горизонтальной направляющей  $PR$ , расположенной на высоте  $z = 2,5$  (рис. 7, слева). Уравнения направляющих  $AD$ ,  $BC$ ,  $MN$  и продольные градиенты  $tga_M^x = -0,6$ ;  $tga_N^x = 1$  в углах  $M$ ,  $N$  представлены в примере 3. В угловых точках  $P$ ,  $R$  портала заданы градиенты  $tga_P^x = 0,4$ ;  $tga_R^x = -1$ . Требуется вычислить 48 коэффициентов уравнений (1), (2), (3) сегментов  $PADR + ABCD + BMNC$  трехсекционной  $C^2$ -гладкой бикубической ленты, принимая граничные условия «плоские углы  $P$ ,  $R$ ,  $M$ ,  $N$ ».

**Решение.** Выполняем расчет  $C^2$ -гладких продольных границ  $PABM$  и  $RDCN$ , используя условия гладкости вида (26) и условия (27) (закрепленные концы). Найдя уравнения продольных границ, непосредственным вычислением по формулам вида (7), (8) находим 21 коэффициент уравнений (1), (2), (3). Остальные 26 коэффициентов (с учетом  $a_{11} = 0$ )



определяются из системы 26 линейных уравнений вида (29), (30), (31). На рис. 7 справа представлен общий вид сооружения с перекрытием свободной формы.

**Заключение. Актуальность.** Задача моделирования ленточных поверхностей возникает в современной архитектуре при проектировании сооружений, обладающих большой пространственной свободой формообразования. В частности, поиски новых нелинейных форм привели к появлению «тентовой архитектуры» [8] и «архитектуры складок» [9], использующих перекрытия со сложными криволинейными очертаниями. Если конструируемая поверхность не имеет больших градиентов относительно некоторой базовой плоскости  $xy$ , то для ее моделирования могут быть эффективно использованы бикубические полиномы от скалярных величин  $x$ ,  $y$  [10].

#### Научная новизна

1. Уравнение бикубической порции содержит 16 неизвестных коэффициентов, для определения которых требуется решить систему 16 линейных уравнений, задающих граничные условия. Предлагается алгоритм, согласно которому решение системы 16 уравнений сводится к решению системы четырех линейных уравнений.

2. Составлены вычислительные алгоритмы формирования гладкой (с гладкостью  $C^1$ ,  $C^2$ ) бикубической ленты, отличающиеся использованием уравнений продольных границ и поперечных направляющих в качестве граничных условий, что позволяет почти вдвое уменьшить размер характеристической матрицы системы линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов, входящих в уравнения бикубических порций.

**Программное обеспечение.** Матричные вычисления (решение систем линейных алгебраических уравнений) выполнены с помощью свободно распространяемой программы SMath Studio. Расчет образующих бикубической ленты и ее визуализация выполнены с применением языка программирования AutoLISP в среде AutoCAD.

#### Библиографический список

1. Jarke J. V. Bicubic patches for approximating non-rectangular control-point meshes // *Computer Aided Geometric Design*. 1986. Vol. 3, № 1. P. 456–459. DOI: 10.1016/0167-8396(86)90021-X.
2. Levner G., Tassinari P., Marini D. A simple general methods for ray tracing bicubic surfaces // *Theoretical Foundations of Computer Graphics and CAD*. New York: Springer-Verlag, 1988. P. 805–820.

3. Gallier J. *Curves and Surfaces in Geometric Modeling: Theory and Algorithms*. University of Pennsylvania. Philadelphia, PA, USA. 2018. P. 61–114.

4. Шикин Е. В., Плис А. И. Кривые и поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей. Москва: Диалог-МИФИ, 1996. 240 с.

5. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование. Москва: ДМК-Пресс, 2020. 406 с.

6. Короткий В. А. Незакономерные кривые в инженерной геометрии и компьютерной графике // *Научная визуализация*. 2022. Т. 14, № 1. С. 1–17. DOI: 10.26583/sv.14.1.01.

7. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве. Москва: Мир, 1982. 304 с.

8. Удлер Е. М., Тостов Е. Проектирование тентовых оболочек // *CADmaster*. 2001. № 1 (6). С. 43–47.

9. Киричков И. В. Преломление категории складки сквозь призму архитектуры // *Архитектура и дизайн*. 2018. № 3. С. 1–11. DOI: 10.7256/2585-7789.2018.3.29422.

10. Готовцев А. А. Autodesk alias: с чего начать? // *CADmaster*. 2012. № 5 (66). С. 42–44.

**КОРОТКИЙ Виктор Анатольевич**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Инженерная и компьютерная графика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), г. Челябинск.

SPIN-код: 7576-1921

AuthorID (РИНЦ): 777039

AuthorID (SCOPUS): 57170871600

ResearcherID: ABF-6205-2020

ORCID: 0000-0002-5266-4701

Адрес для переписки: korotkiiva@susu.ru

**УСМАНОВА Екатерина Александровна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Инженерная и компьютерная графика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), г. Челябинск.

SPIN-код: 3351-0017

AuthorID (РИНЦ): 777188

AuthorID (SCOPUS): 55346094500

ResearcherID: AAL-1653-2021

Адрес для переписки: usmanovaea@susu.ru

#### Для цитирования

Короткий В. А., Усманова Е. А. Бикубическая ленточная поверхность // *Омский научный вестник*. 2023. № 2 (186). С. 19–27. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-19-27.

Статья поступила в редакцию 19.01.2023 г.

© В. А. Короткий, Е. А. Усманова

## BICUBIC RIBBON SURFACE

A bicubic ribbon is a surface of constant width extended along the  $Ox$ -axis and formed by a set of rectangular bicubic portions connected to each other with smoothness  $C^1$  (continuity of gradient between portions) or  $C^2$  (continuity of curvature). Each portion is limited by cubic parabolas lying in vertical planes  $x=\text{const}$ ,  $y=\text{const}$ . The article presents algorithms for calculating a bicubic band based on the use of boundary curve equations as the main boundary conditions. The «flat corners» conditions are accepted as additional boundary conditions. The proposed approach makes it possible to reduce the size of the characteristic matrix of a system of linear equations with respect to the coefficients included in the equations of bicubic portions. For example, the calculation of 16 coefficients of the equation of a bicubic portion passing through fixed boundary curves reduces to solving a system of four linear equations. Criteria for smooth joining of bicubic portions are formulated (in the form of theorems). Theorem 1 formulates and proves the continuity conditions for the gradient. Theorem 2 contains conditions for the continuity of curvature. Examples of calculation and visualization of  $C^1$  and  $C^2$ -smooth ribbon surfaces, consisting of two or three bicubic portions, are presented.

**Keywords:** bicubic portion, cubic parabola, smoothness conditions, gradient, flat corners, pinched ends.

### References

1. Jarke J. V. Bicubic patches for approximating non-rectangular control-point meshes // *Computer Aided Geometric Design*. 1986. Vol. 3, no. 1. P. 456–459. DOI: 10.1016/0167-8396(86)90021-X. (In Engl.).
2. Levner G., Tassinari P., Marini D. A simple general methods for ray tracing bicubic surfaces // *Theoretical Foundations of Computer Graphics and CAD*. New York: Springer-Verlag, 1988. P. 805–820. (In Engl.).
3. Gallier J. *Curves and Surfaces in Geometric Modeling: Theory and Algorithms*. University of Pennsylvania. Philadelphia, PA, USA. 2018. P. 61–114. (In Engl.).
4. Shikin E. V., Plis A. I. *Krivyye i poverkhnosti na ekrane komp'yutera. Rukovodstvo po splaynam dlya pol'zovateley [Curves and surfaces on a computer screen. A guide to splines for users]*. Moscow, 1996. 240 p. (In Russ.).
5. Golovanov N. N. *Geometricheskoye modelirovaniye [Geometric modelling]*. Moscow, 2020. 406 p. (In Russ.).
6. Korotkiy V. A. *Nezakonomernyye krivyye v inzhenernoy geometrii i komp'yuternoy grafike [Irregular Curves in Engineering Geometry and Computer Graphics]* // *Nauchnaya vizualizatsiya. Scientific Visualization*. 2022. Vol. 14, no. 1. P. 1–17. DOI: 10.26583/sv.14.1.01. (In Russ.).
7. Foks A., Pratt M. *Vychislitel'naya geometriya. Primeneniye v proyektirovani i na proizvodstve [Computational geometry. Applications in design and production]*. Moscow, 1982. 304 p. (In Russ.).
8. Udler E. M., Tostov E. *Proyektirovaniye tentovykh obolochek [Designing awning covers]* // *CADmaster. CADmaster*. 2001. No. 1 (6). P. 43–47. (In Russ.).
9. Kirichkov I. V. *Prelomleniye kategorii skladki skvoz' prizmu arkhitektury [Reflecting the category of the fold through the prism of architecture]* // *Arkhitektura i dizayn. Architecture and Design*. 2018. No. 3. P. 1–11. DOI: 10.7256/2585-7789.2018.3.29422. (In Russ.).
10. Gotovtsev A. A. *Autodesk alias: s chego nachat'?* [Autodesk alias: Where do I start?] // *CADmaster. CADmaster*. 2012. No. 5 (66). P. 42–44. (In Russ.).

---

**KOROTKIY Viktor Anatolyevich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Engineering and Computer Graphics Department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk. SPIN-code: 7576-1921  
AuthorID (RSCI): 777039  
AuthorID (SCOPUS): 57170871600  
ResearcherID: ABF-6205-2020  
ORCID: 0000-0002-5266-4701  
Correspondence address: korotkiiva@susu.ru

**USMANOVA Ekaterina Aleksandrovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Engineering and Computer Graphics Department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk. SPIN-code: 3351-0017  
AuthorID (RSCI): 777188  
AuthorID (SCOPUS): 55346094500  
ResearcherID: AAL-1653-2021  
Correspondence address: usmanovaea@susu.ru

### For citations

Korotkiy V. A., Usmanova E. A. Bicubic ribbon surface // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 19–27. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-19-27.

Received January 19, 2023.

© V. A. Korotkiy, E. A. Usmanova

## ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОДКОПОЧНЫХ РАБОТ ЭКСКАВАТОРОМ С ЦЕЛЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ СТЕНКИ ТРУБОПРОВОДА

При управлении движением ковша экскаватора оператор управляет поступательными перемещениями в гидроцилиндрах, которые в общем случае являются независимыми. Однако обеспечение движения режущей кромки ковша по заданной траектории (например, по горизонтальной прямой) требует от оператора определенных навыков и дополнительной концентрации внимания. Это значительно влияет на утомляемость оператора при проведении указанных работ. В этом случае актуальным становится решение проблемы разработки автоматизированной системы управления, позволяющей осуществлять расчет изменения углов поворота во вращательных шарнирах манипулятора экскаватора, обеспечивающих заданное движение ковша. Оператор при этом может указывать только начальные и целевые точки траектории и направление движения ковша. В статье на основе исследования геометрических объектов пространства приращений обобщенных координат разработан алгоритм, позволяющий выполнять моделирование движения точек ковша экскаватора с заданным удалением от верхней кромки ремонтируемого трубопровода. В качестве геометрических объектов исследованы положения плоскостей и их пересечения, которые заданы линейными системами уравнений, отражающими взаимосвязь приращений обобщенных координат механизма манипулятора от скоростей выходного звена ковша экскаватора. Исследованы положения указанных геометрических объектов для различных положений механизма манипулятора экскаватора и различных значений скоростей выходного звена. Приведены результаты компьютерного моделирования движения манипулятора экскаватора.

**Ключевые слова:** плоскости пространства приращений обобщенных координат, геометрическое моделирование, синтез движения, механизм манипулятора экскаватора, ремонт трубопроводов, компьютерное моделирование движений, выходное звено.

**Введение.** При ремонте трубопроводов основной машиной для освобождения трубопровода от грунта является экскаватор. Экскаватор позволяет осуществлять выемку грунта с обеих сторон от трубопровода, однако процесс удаления слоя грунта непосредственно над трубой требует соблюдения более строгих мер безопасности в связи с тем, что риск повреждения трубопровода при выполнении данной операции существенно выше, чем при откапывании боковых приямков траншеи [1–7]. В связи с вышеизложенным становится актуальным решение задачи разработки и использования автоматизированной системы управления работой гидроцилиндров с наличием блока, обеспечивающего активную безопасность. Это позволит исключить вероятность повреждения трубопровода ковшом экскаватора [8–13]. Устройство безопасности

предназначено для автоматического управления движением ковша экскаватора с постоянным контролем приближения ковша к стенке трубопровода. При разработке указанной автоматизированной системы управления существует необходимость в решении некоторых геометрических задач (например, вычисление значений обобщенных координат, углов ориентации ковша экскаватора и другое). Оценка наличия или отсутствия решений в используемых математических моделях может быть выполнена с помощью проведения соответствующего геометрического и компьютерного моделирования.

**Постановка задачи исследования.** Исходными данными задачи компьютерного управления движением механизма манипулятора экскаватора, позволяющего осуществлять перемещения ковша, являются следующие геометрические параметры (рис. 1.):

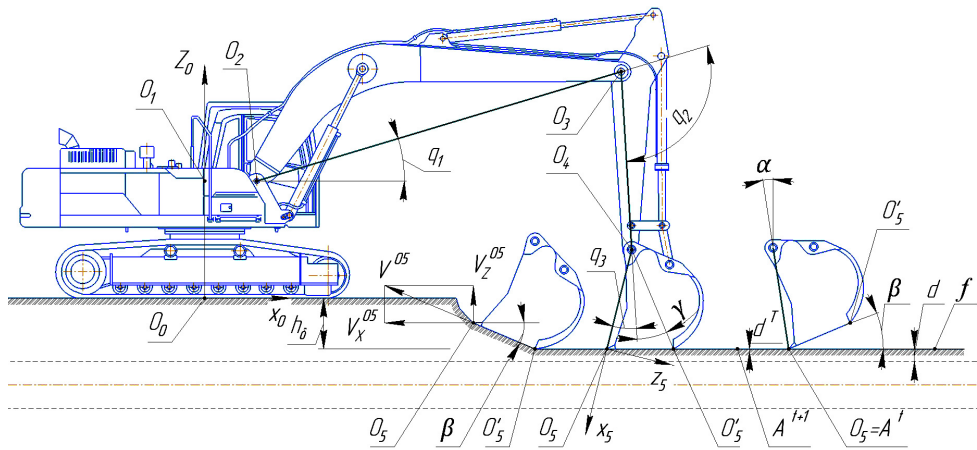


Рис. 1. Геометрические параметры положения ковша относительно трубопровода

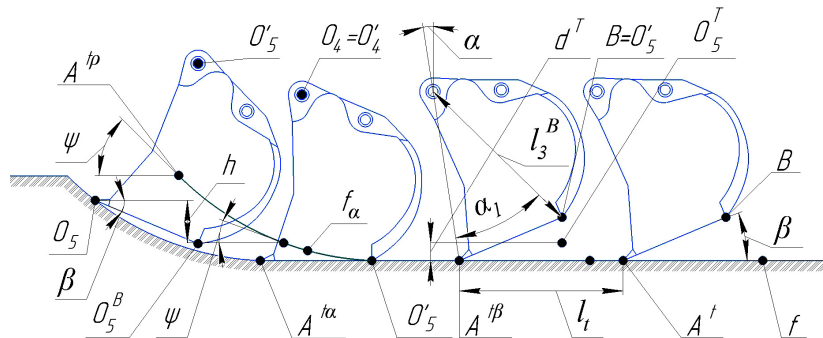


Рис. 2. Геометрическая схема движения ковша по участкам заданной траектории

1. Длины звеньев  $l_1, l_2, l_3$  и начальные значения трех обобщенных координат  $q_1, q_2$  и  $q_3$ , определяющих вращение звеньев механизма в кинематических парах, оси вращения которых проходят через точки  $O_2, O_3$  и  $O_4$ . Так как вращение механизма экскаватора вокруг оси  $z_0$  не учитывается при моделировании движения ковша, то будем считать заданный механизм плоским.

2. Заданные траектории  $f$  движения точек  $O_5$  и  $B$  и углы  $\beta$  и  $\alpha$  ориентации ковша экскаватора в неподвижной системе координат  $O_0x_0z_0$ .

3. Безопасное расстояние  $d$  от ковша до верхней кромки ремонтируемого трубопровода и заданное расстояние  $d^T$ , характеризующее отклонение точки центра выходного звена от заданной траектории  $f$ .  
Выходными данными поставленной задачи являются вычисленные промежуточные значения обобщенных координат  $q_i$ , обеспечивающие движение ковша по заданным траекториям с заданными условиями. При этом необходимо обеспечить удаление  $d$  при движении точек  $O_5$  и  $O'_5$  от верхней стенки трубопровода на расстоянии, равном 200 мм (рис. 1).

**Теория.** Пусть необходимо рассчитать приращение обобщенных координат  $\Delta q_i$ , позволяющих переместить точку  $O_5 = A^t$  в следующую точку  $A^{t+1}$  заданной траектории  $f$ , по которой осуществляется движение точки  $O_5$ . Точка  $A^t$  задает начальную точку участка траектории, на котором обеспечивается наклон режущей кромки  $O_5B$  к горизонтали, определяемый углом  $\beta$  (рис. 2). Траектория движения  $f$  находится на глубине  $h_3$  от поверхности грунта и на безопасном расстоянии  $d$  от верхней кромки трубопровода (рис. 1). Известно, что между проекциями вектора скорости  $\mathbf{V}^{05}$  ( $V_x^{05}, V_z^{05}$ ) точки  $O_5$

на неподвижные оси системы координат  $O_0x_0z_0$  и приращениями обобщенных координат существует линейная зависимость [14–16]:

$$\begin{aligned} J_{11}\Delta q_1 + J_{12}\Delta q_2 + J_{13}\Delta q_3 &= V_x^{0,5} \\ J_{21}\Delta q_1 + J_{22}\Delta q_2 + J_{23}\Delta q_3 &= V_z^{0,5} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta q_i$  — приращение обобщенных координат за одну итерацию, заданную промежутком времени  $t$ ;  $J_{ji}$  — коэффициенты матрицы частных передаточных отношений. На рис. 2 представлены траектории движения точек  $O_5$  и  $B$  ковша, перемещение которых моделируется на участках, заданных точками  $A^tA^{\beta}$  и  $A^{\beta}A^{\psi}$ .

При движении ковша необходимо вначале обеспечить заданный угол наклона режущей кромки  $\beta = 20^\circ$  на участке траектории, заданной точками  $A^t$  и  $A^{\beta}$  (рис. 2). После движения на траектории, заданной точками  $A^t$  и  $A^{\beta}$  с обеспечением угла  $\beta$ , необходимо далее изменять угол  $\alpha$  по окончании процесса набора грунта ковшом (рис. 1, 2). Угол  $\alpha$  определяется углом наклона отрезка  $O_4O_5$  по отношению к вертикальной прямой.

Для обеспечения необходимой ориентации ковша в неподвижной системе координат используем третье линейное уравнение:

$$J_{31}\Delta q_1 + J_{32}\Delta q_2 + J_{33}\Delta q_3 = \omega_y \quad (2)$$

где  $J_{3i}$  — коэффициенты матрицы частных передаточных отношений;  $\omega_y$  — угловая скорость поворота системы координат  $O_5x_5z_5$ , связанной с ковшом вокруг оси  $O_5y_5$ , проходящей через точку  $O_5$ . На рис. 1 ось  $O_5y_5$  проецируется в точку  $O_5$ . При движении

ковша на участке траектории, заданной точками  $A^t$  и  $A^B$  значение  $\omega_y$  принимается равным нулю. На участке траектории, заданной точками  $A^B$  и  $A^a$ , принимается  $\omega_y = 2^\circ/\text{сек}$ .

На рис. 2 изображено положение точки  $O_5^T$ , задающей положение точки  $O_5$  при реализации значений  $\Delta q_i$ , вычисленных по уравнениям (1) и (2). Отклонение положения точки  $O_5$  от заданной траектории  $f$  обозначено параметром  $d^T$ . При совместном решении линейных уравнений (1) и (2) может возникнуть ситуация, когда значение параметра  $d^T$  получается больше заданной точности позиционирования  $\delta$  центра выходного звена. Параметр  $d^T$  определяет удаление точки  $O_5^T$ , полученной реализацией значений  $\Delta q_i$  ( $q_i = q_i + \Delta q_i$ ) за одну итерацию от заданной траектории  $f$ . Данный параметр вычисляется по формуле:

$$d^T = \frac{|a(r_0 - r_t)|}{|a|}, \quad (3)$$

где  $a$  — направляющий вектор прямой  $f$ ,  $r_0$  — радиус вектор точки  $O_5^T$ ,  $r_t$  — радиус вектор точки  $A^t$ , через которую проходит прямая  $f$ .

Если значение  $d^T$  будет превышать заданную величину  $\delta$ , необходимо уменьшить значение модуля вектора линейной скорости  $|V^{05}|$ . Значение параметра  $\delta$  принимается в соответствии с заданным безопасным расстоянием  $d$  от точек  $O_5$  и  $B$  ковша экскаватора до верхней стенки трубопровода. На рис. 3 представлена зависимость значения параметра  $d^T$  от смещения  $l_t$  точки  $O_5$  по траектории  $f$ , заданной отрезком  $A^t A^B$  по направлению, противоположному оси  $x_0$  (рис. 2) [17–20]. На рис. 3 представлены графики функций  $d^T = f(l_t)$  для различных значений модуля вектора скорости  $|V^{05}|$ . Анализ графиков функций (рис. 3) показывает, что оптимальным значением  $|V^{05}|$  при расчете промежуточных конфигураций является значение  $|V^{05}| = 1,5$  см/сек, так как отклонение от заданной траектории составляет около 2 см, что удовлетворяет заданным условиям безопасности.

Графики функций  $d^T = f(l_t)$  построены на основе проведенных вычислительных экспериментов. При заданном горизонтальном направлении вектора скорости  $V^{05}$  для каждой точки  $N(q_1^N, q_2^N, q_3^N)$ , обеспечивающей заданный угол  $\beta$ , вычислялось значение параметра  $d^T$ .

На участке траектории, заданном точками  $A^B A^a$ , синтез движений происходит с изменением угла  $\alpha$  на заданную величину  $\Delta\alpha = 2^\circ$  за одну итерацию. Соответственно, на участке  $A^a A^B$  также с изменением угла  $\alpha$  на величину  $\Delta\alpha = 2^\circ$ , но со смещением целевой точки на высоту  $h$  (если угол  $\beta$  начинает принимать значение  $\beta < 0$  (рис. 2):

$$h = O_5 O_5^B \cdot \cos(90^\circ - |\beta|). \quad (4)$$

Пусть угол  $\beta$  начинает принимать отрицательное значение. В этом случае точка  $O_5$  будет расположена выше точки  $O_5^B = B$ . Следовательно, в качестве центра выходного звена необходимо принять точку  $O_5^B$  (точка  $B$  теперь будет располагаться ближе к верхней стенке трубопровода, чем точка  $O_5$ ). При этом нужно перезадать модель кинематической цепи. В табл. 1, 2 представлены значения геометрических параметров, позволяющих задать модели кинематической цепи манипулятора экскаватора М2-2-2 и М2-2-2-8-10, когда в качестве центра

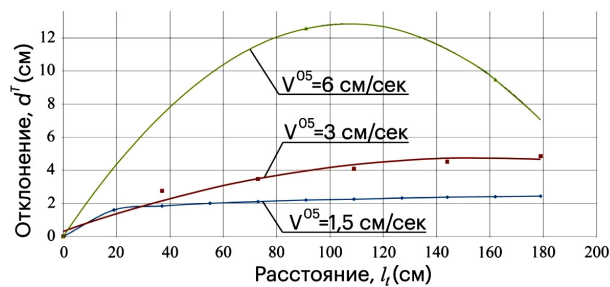


Рис. 3. Графики функции  $d^T = f(l_t)$

Таблица 1

Геометрические параметры модели кинематической цепи для механизма М2-2-2 для случая, когда точка  $O_5$  является центром выходного звена

Система координат	$O_3$	$O_4$	$O_5$
$q_i$	$q_1$	$q_2$	$q_3$
$l_i$ , (см)	$l_1 = 600$	$l_2 = 281$	$l_3 = 161$
$l_{smi}$ , (см)	0	0	0
$n_{kod}$	2	2	2

Таблица 2

Геометрические параметры модели кинематической цепи для механизма М2-2-2-8-10 для случая, когда точка  $O_5$  является центром выходного звена

	$O_3$	$O_4$	$O_5$	$O_5''$	$O_5^B$
$q_i$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	0	0
$l_i$ , (см)	$l_1 = 600$	$l_2 = 281$	0	0	0
$l_{smi}$ , (см)	0	0	0	$\alpha_1$	$l_3^B = 170$
$n_{kod}$	2	2	2	8	10

выходного звена принимается точка  $O_5$  или точка  $O_5^B = B$ . Обозначения механизмов приняты в соответствии с методикой, представленной в работе [14].

В табл. 1, 2 параметры  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$  задают длины отрезков  $O_2 O_3$ ,  $O_3 O_4$  и  $O_4 O_5$  (рис. 1.);  $l_{smi}$  — смещения вдоль осей координат или углы поворота при значениях параметра  $n_{kod} = 7 \dots 9$  или  $n_{kod} = 10 \dots 12$ ;  $n_{kod}$  — коды кинематических преобразователей [14]. Угол  $\alpha_1$  и длина  $l_3^B$  определяют положение точки  $B$  на ковше экскаватора (рис. 2). Точки  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $O_4$ ,  $O_5$ ,  $O_5''$ ,  $O_5^B$  задают соответственно центры систем координат, связанных со звеньями механизмов.

**Результаты экспериментов.** Для анализа области допустимых положений точки  $N^Q$ , определяющейся пересечением плоскостей  $\Sigma_1^Q$ ,  $\Sigma_2^Q$  и  $\Sigma_3^Q$ , заданных линейными уравнениями (1) и (2) в пространстве приращений обобщенных координат  $Q$  были построены следы указанных плоскостей для различных положений механизма манипулятора экскаватора. В работе геометрические объекты, располагающиеся в пространстве приращений обобщенных координат, принято обозначать с индексом  $^Q$ . Анализ полученных положений точек  $N^Q$  указал на то, что решение системы уравнений (1) и (2) удовлетворяет заданным требованиям, если указанная точка

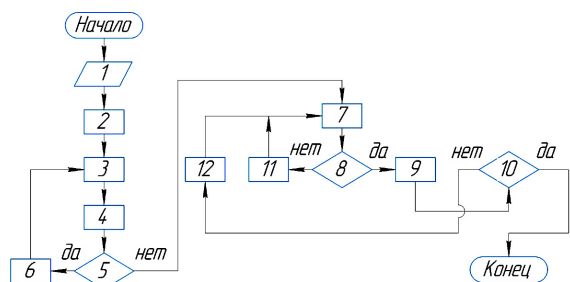


Рис. 4. Схема алгоритма синтеза движения механизма манипулятора экскаватора

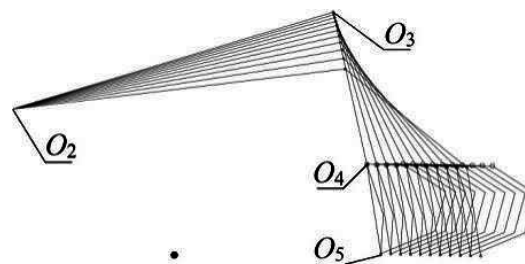
находится внутри сферы  $\Psi^Q$  с центром, совпадающим с началом координат пространства  $Q$  и радиусом, равным 9,5 град/сек. Если указанное условие не выполняется, необходимо изменять значения  $V_x^{05}$ ,  $V_z^{05}$  и  $\omega_y$  в сторону их уменьшения.

Это позволяет обеспечить заданную точность позиционирования.

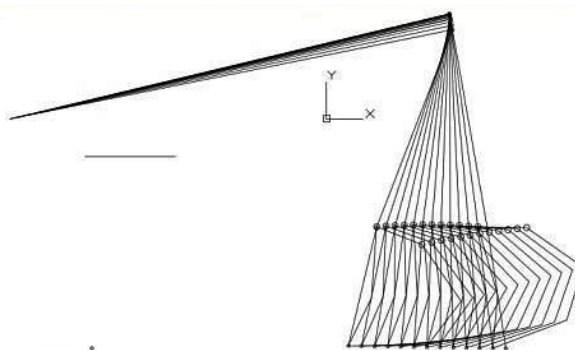
Схема алгоритма автоматического управления движением звеньев механизма манипулятора экскаватора представлена на рис. 4.

На рис. 4 приняты следующие обозначения: 1 — ввод данных  $l_1, l_2, l_3, l_3^B, \alpha_1, d, h_s, A^t, A^{ta}, A^{tb}, \beta$ ; 2 — расчет начальных значений  $q_1, q_2$  и  $q_3$ , обеспечивающих положение ковша, соответствующее заданному положению точки  $O_5 = A^t$  и заданному углу  $\beta$ ; 3 — вычисление положения следующей точки  $A^{t+1}$  на заданной траектории  $f$ ; 4 — вычисление матрицы частных передаточных отношений (коэффициентов  $J_{ij}$ ); 5 — точка  $O_5$  принадлежит отрезку траектории, на котором обеспечивается значение угла  $\beta$  ( $O_5 \in A^t A^t$ ); 6 — вычисление вектора  $Q_1 (\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3)$  при решении системы уравнений (1) и (2), (синтез движений с заданной ориентацией  $\omega_y = 0$ , вычисление  $q_i = q_i + \Delta q$  передача управляющей информации на гидроцилиндры, для обеспечения поворотов  $\Delta q_i$  в шарнирах). Определение принадлежности точки  $N^Q \in \Psi^Q$ ; 7 — вычисление вектора  $Q_2 (\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3)$  при изменении  $\Delta \omega_y = 2^\circ/\text{сек}$ , вычисление  $q_i = q_i + \Delta q_i$  (передача управляющей информации на гидроцилиндры). Определение принадлежности точки  $N^Q \in \Psi^Q$ ; 8 — значение угла  $\beta < 0^\circ$ ; 9 — расчет вектора  $V^{05}$  при движении точки  $O_5$  по участку траектории  $f_a$ , заданной точками  $A^{ta} A^{tp}$ . За центр выходного звена принимается точка  $B = O_5'$ ; 10 — конечная точка траектории  $A^{ta} A^{tp}$  достигнута; 11 — вычисление следующего положения точки  $A^t$  на заданной траектории  $A^t A^{ta}$ ; 12 — вычисление коэффициентов  $J_{ij}$  и направления и модуля вектора скорости  $V_x^{05} = h \cdot \text{tg} \psi$ ,  $V_z^{05} = h$ . Угол  $\psi$  определяется касательной к заданной траектории, которой является окружность  $f_a$ .

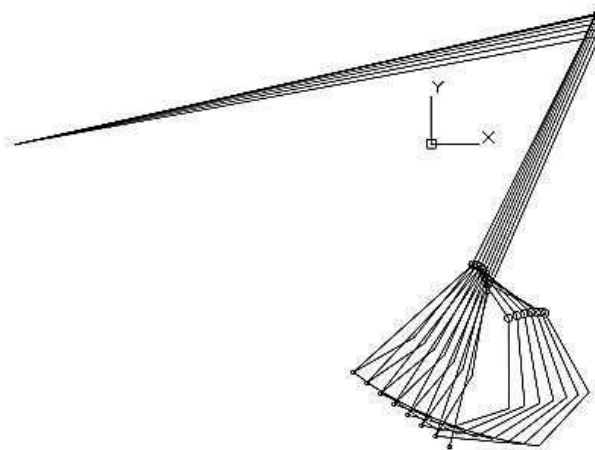
На рис. 5 представлены результаты синтеза движения ковша экскаватора на основе использования разработанного алгоритма. Геометрическое компьютерное моделирование выполнялось с использованием алгоритмического языка программирования AutoLISP и системы NanoCAD. Синтез движения обеспечивает заданное безопасное удаление от верхней кромки трубопровода. При построении движений изменялась также глубина установки ковша экскаватора  $h$ . Результаты компьютерного моделирования показали работоспособность алгоритма синтеза движений ковша на различных глубинах с обеспечением заданного удаления от верхней кромки трубопровода.



а)



б)



в)

Рис. 5. Результаты компьютерного геометрического моделирования движения рабочего оборудования экскаватора при значениях параметров: а)  $\beta = 20^\circ$ ; б)  $\Delta \alpha = 2^\circ$ ; в) моделирование движения по круговой траектории

**Основные результаты и выводы.** На основе геометрического моделирования определена область допустимых решений линейной системы уравнений, используемой при определении приращений обобщенных координат механизма на каждой итерации. Данную область задает сфера заданного радиуса с центром, совпадающим с началом координат пространства приращений обобщенных координат.

На основе проведенного геометрического компьютерного моделирования определено максимальное значение модуля вектора скорости точки, принадлежащей режущей кромке ковша, при котором достигается заданная точность позиционирования. Данное значение равно полутора сантиметрам в секунду за одну итерацию.

Разработан алгоритм синтеза движения экскаватора с изменением положения точек ковша, для

которых моделируется перемещения по заданным траекториям. Данный алгоритм обеспечивает заданное удаление ковша экскаватора от верхней кромки трубопровода.

Проведенные исследования могут быть использованы при разработке информационно-управляющих комплексов подвижных объектов, в частности при разработке автоматизированных систем управления движением рабочего оборудования экскаватора.

#### Библиографический список

1. Аладинский В. В., Малков А. Г., Ушаков А. В. Метод ремонта газопроводов с использованием труб, бывших в эксплуатации // Территория Нефтегаз. 2009. № 8. С. 56–60.
2. Булавинцева А. Д., Мазуркин П. М. Динамика аварий по причиненному ущербу на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО АК «Транснефть» // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 4. С. 64–67.
3. Tiratsoo J. About decommissioning of production and transportation of oil: the UK experience // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2017. № 1. P. 82–83.
4. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modelling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws // Engineering Structures. 2011. Vol. 33 (5). P. 1423–1438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.001.
5. Archibald I. C. Soil stabilizer // Pipeline and Gas Journal. 1984. No. 11. P. 44–46.
6. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. 2016. P. 9–43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2.
7. Mourad N., Rabia K. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress // Arabian Journal for Science and Engineering. 2015. Vol. 40, Issue 11. P. 3273–3283. DOI: 10.1007/s13369-015-1723-9.
8. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // Frontiers in Energy. 2020. Issue 2. DOI: 10.1007/s11708-020-0672-5.
9. Charru F. Hydrodynamic Instabilities. Cambridge University Press, 2011. 391 p.
10. Amiya K. L. Material Selection and Performance in Oil and Gas Industry // Applied Metallurgy and Corrosion Control. 2017. P. 269–347. DOI: 10.1007/978-981-10-4684-1\_9.
11. Демиденко А. И., Кузнецов И. С. Совершенствование конструкции рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Вестник СибАДИ. 2020. № 17 (1). P. 12–21. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21.
12. Аникин Е. А. Эффективные методы ремонта магистральных трубопроводов. Москва: ИРЦ Газпром, 2001. 108 с.
13. Салюков В. В., Халыев Н. Х., Селиверстов В. Г. [и др.] Ремонт локальных участков трубопровода. Москва: ИРЦ Газпром, 2001. 73 с.

14. Притыкин Ф. Н. Виртуальное моделирование движений роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с.

15. Whitney D. E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2010. № 94 (4). P. 303–309. DOI: 10.1115/1.3426611.

16. Притыкин Ф. Н., Небритов В. И. Способ преодоления тупиковых ситуаций при движении до целевой точки по произвольной траектории центра выходного звена // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2019. № 12. С. 3–9. DOI: 10.14489/vkit.2019.12.pp.003-009.

17. Притыкин Ф. Н. Исследование кинематических параметров андроидного робота при автоматизированном синтезе движений по вектору скоростей // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-5-9.

18. Притыкин Ф. Н. Моделирование гиперповерхностей, отражающих взаимосвязь кинематических параметров механизма андроидного робота // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2022. Т. 19, № 7 (217). С. 21–29. DOI: 10.14489/vkit.2022.07.pp.021-029.

19. Вергинская Н. Д. Задачи геометрического моделирования технологических процессов. Москва: Издат. дом Академии естествознания, 2015. 132 с.

20. Иванов Г. С. Теоретические основы начертательной геометрии. Москва: Машиностроение, 1998. 158 с. ISBN 5-217-02673-1.

**ПРИТЫКИН Федор Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 7628-8023

ORCID: 0000-0001-8081-6840

AuthorID (SCOPUS): 6507269253

Адрес для переписки: pritykin@mail.ru

**КУЗНЕЦОВ Илья Сергеевич**, аспирант кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6890-3069

ORCID: 0000-0002-6524-4976

Адрес для переписки: mrprogamer111@gmail.com

#### Для цитирования

Притыкин Ф. Н., Кузнецов И. С. Геометрическое моделирование процессов выполнения подкопочных работ экскаватором с целью предотвращения повреждения стенки трубопровода // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 28–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-28-34.

Статья поступила в редакцию 30.01.2023 г.

© Ф. Н. Притыкин, И. С. Кузнецов

## GEOMETRIC MODELING OF THE PROCESSES OF EXCAVATION BY AN EXCAVATOR IN ORDER TO PREVENT DAMAGE TO THE PIPELINE WALL

When controlling the motion of the excavator bucket, the operator controls the translational motions in the hydraulic cylinders, which are generally independent. However, ensuring the motion of the cutting edge of the bucket along a given trajectory (for example, along a horizontal straight line) requires certain skills and additional concentration of attention from the operator. This significantly affects the fatigue of the operator during these works. In this case, it becomes relevant to solve the problem of developing an automated control system that makes it possible to calculate the change in the angles of rotation in the rotary joints of the excavator, which provide the specified motion of the bucket. In this case, the operator can only indicate the start and target points of the trajectory and the direction of motion of the bucket. In the article, based on the research, an algorithm has been developed that allows you to simulate the motion of points of an excavator bucket with a given distance from the upper edge of the pipeline. The results of computer simulation of the motion of the excavator manipulator are presented.

**Keywords:** motion synthesis, excavator arm mechanism, geometric modeling, pipeline repair, computer simulation of motions, output link.

### References

1. Aladinskiy V. V., Malkov A. G., Ushakov A. B. Metod remonta gazoprovodov s ispol'zovaniyem trub, byvshikh v ekspluatatsii [Method for repairing gas pipelines using second-hand pipes] // *Territoriya Neftegaz. Neftegas Territory*. 2009. No. 8. P. 56–60. (In Russ.).
2. Bulavintseva A. D., Mazurkin P. M. Dinamika avariy po prichinennomu ushcherbu na lineynoy chasti magistral'nykh nefteprovodov OAO AK «Transneft'» [Dynamics of accidents caused by damage on the linear part of Transneft's main oil pipelines] // *Sovremennyye naukoemykiye tekhnologii. Modern Knowledge-Intensive Technologies*. 2011. No. 4. P. 64–67. (In Russ.).
3. Tiratsoo J. About decommissioning of production and transportation of oil: the UK experience // *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2017. No. 1. P. 82–83. (In Engl.).
4. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modelling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws // *Engineering Structures*. 2011. Vol. 33 (5). P. 1423–1438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.001. (In Engl.).
5. Archibald I. C. Soil stabilizer // *Pipeline and Gas Journal*. 1984. No. 11. P. 44–46. (In Engl.).
6. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // *Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems*. 2016. P. 9–43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2. (In Engl.).
7. Mourad N., Rabia K. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015. Vol. 40, Issue 11. P. 3273–3283. DOI: 10.1007/s13369-015-1723-9. (In Engl.).
8. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // *Frontiers in Energy*. 2020. Issue 2. DOI: 10.1007/s11708-020-0672-5. (In Engl.).
9. Charru F. *Hydrodynamic Instabilities*. Cambridge University Press, 2011. 391 p. (In Engl.).
10. Amiya K. L. Material Selection and Performance in Oil and Gas Industry // *Applied Metallurgy and Corrosion Control*. 2017. P. 269–347. DOI: 10.1007/978-981-10-4684-1\_9. (In Engl.).
11. Demidenko A. I., Kuznetsov I. S. Sovershenstvovaniye konstruktssii rabochego oborudovaniya gidravlicheskogo ekskavatora [Improvement of the hydraulic excavator's working equipment] // *Vestnik SibADI. The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. Vol. 17 (1). P. 12–21. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21. (In Russ.).
12. Anikin E. A. Effektivnyye metody remonta magistral'nykh truboprovodov [Effective repair methods for trunk pipelines]. Moscow, 2001. 108 p. (In Russ.).
13. Salyukov V. V., Khallyyev N. Kh., Seliverstov V. G. [et al.]. Remont lokal'nykh uchastkov truboprovoda [Repair of localised pipeline sections]. Moscow, 2001. 73 p. (In Russ.).
14. Pritykin F. N. Virtual'noye modelirovaniye dvizheniy robotov, imeyushchikh razlichnuyu strukturu kinematcheskikh tsepey [Virtual simulation of robot movements with different kinematic chain structures]. Omsk, 2014. 172 p. (In Russ.).
15. Whitney D. E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2010. No. 94 (4). P. 303–309. DOI: 10.1115/1.3426611. (In Engl.).

16. Pritykin F. N., Nebritov V. I. Sposob preodoleniya tupikovykh situatsiy pri dvizhenii do tselevoy tochki po proizvol'noy trayektorii tsentra vykhodnogo zvena [Method for overcoming the dead ends during movements to the target point along an arbitrary trajectory of the output link center] // Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy. *Herald of Computer and Information Technologies*. 2019. No. 12. P. 3–9. DOI: 10.14489/vkit.2019.12.pp.003-009. (In Russ.).

17. Pritykin F. N. Issledovaniye kinematicheskikh parametrov androidnogo robota pri avtomatizirovannom sinteze dvizheniy po vektoru skorostey [Study of kinematic parameters of android robot in automated synthesis of motions on velocity vector] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022. No. 2 (182). P. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-5-9. (In Russ.).

18. Pritykin F. N. Modelirovaniye giperpoverkhnostey, otrazhayushchikh vzaimosvyaz' kinematicheskikh parametrov mekhanizma androidnogo robota [Simulation of hypersurfaces based on the database of kinematic parameters of the android robot mechanism] // Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy. *Herald of Computer and Information Technologies*. 2022. Vol. 19, no. 7 (217). P. 21–29. DOI: 10.14489/vkit.2022.07.pp.021-029. (In Russ.).

19. Vertinskaya N. D. Zadachi geometricheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov [The tasks for geometric modelling of technological processes]. Moscow, 2015. 132 p. (In Russ.).

20. Ivanov G. S. Teoreticheskiye osnovy nachertatel'noy geometrii [Theoretical foundations of descriptive geometry]. Moscow, 1998. 158 p. ISBN 5-217-02673-1. (In Russ.).

---

**PRITYKIN Fedor Nikolayevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Engineering Geometry and CAD Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 7628-8023

AuthorID (SCOPUS): 6507269253

ORCID: 0000-0001-8081-6840

Correspondence address: pritykin@mail.ru

**KUZNETSOV Ilya Sergeevich**, Graduate Student of Engineering Geometry and CAD Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 6890-3069

ORCID: 0000-0002-6524-4976

Correspondence address: mrprogamer111@gmail.com

#### For citations

Pritykin F. N., Kuznetsov I. S. Geometric modeling of the processes of excavation by an excavator in order to prevent damage to the pipeline wall // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 28–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-28-34.

Received January 30, 2023.

© F. N. Pritykin, I. S. Kuznetsov

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СБОРНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА СО СМЕННЫМИ МНОГОГРАННЫМИ ПЛАСТИНАМИ МЕТОДАМИ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

В статье рассмотрены вопросы стойкости сборного режущего инструмента в процессе обработки металла резанием, а также риск потери его работоспособности. В ходе оценки вероятности отказа инструмента при нарушении установленного критерия износа используются результаты производственного эксперимента при черновой обработке детали «Вал» из прутка диаметром 58 мм из сплава ХН77ТЮР. Обработка детали велась сборным режущим инструментом со сменными многогранными пластинами круглой и квадратной формы, имеющими по типу специальное исполнение из сплавов: ВК6м, ВК8 и Т15К6. Для оценки полученных результатов и описания их распределения авторами используется критерий согласия Шапиро–Уилка для проверки корреляции между исходными данными и соответствующим предположением об их нормальном распределении. Так как полученные данные производственных испытаний не подчиняются нормальному закону распределения, для дальнейшего анализа применяется непараметрический метод Парзена–Розенблатта.

**Ключевые слова:** сборный режущий инструмент, сменные многогранные пластины, работоспособность, вероятность отказа, критерий согласия Шапиро–Уилка, непараметрическая статистика, метод Парзена–Розенблатта, функция плотности распределения.

**Введение.** В современном машиностроении широкое применение получили сборные режущие инструменты со сменными многогранными пластинами (СМП). Изготовление СМП из твердого сплава обеспечивает их высокую эффективность, которая выражается в увеличении срока службы, производительности инструмента, а также в возможности быстрой замены в случае поломки, скола или затупления [1]. Однако на практике вопрос стойкости сборного режущего инструмента и повышения его работоспособности остается актуальным. В машиностроительном производстве инструмент с твердосплавными СМП эксплуатируется при высоких температурах, с большой скоростью резания, а также ударных и механических нагрузках [2, 3]. В результате нагрузок происходит затупление режущей кромки пластины или ее разрушение частично или полностью на различных этапах процесса резания. В производственных условиях затупление СМП имеет допустимый предел, т.е. величину износа, при которой наступает отказ и сборный режущий инструмент теряет свою работоспособность [4, 5]. Для оценки вероятности отказа работы инструмента

на основе статистических данных производственных испытаний могут быть использованы непараметрические методы в случае, если их распределение не поддается ни одному закону распределения.

**Постановка задачи.** В ходе анализа причин потери работоспособности выделяют три основных фактора, следствием которых они являются: это нерациональные режимы резания, неправильный выбор инструментального материала и неправильная геометрия. Данные факторы зависят от физико-механических характеристик как инструментального, так и обрабатываемого материала и рациональной геометрии режущей части [6, 7]. Для оценки вероятности отказа инструмента при нарушении критерия износа могут применяться различные способы, в том числе с использованием компьютерного моделирования оценки риска потери работоспособности инструмента по данным экспериментальных исследований. В данном исследовании основными данными для моделирования являются выборки по результатам работы сборного режущего инструмента с различными геометрическими параметрами из нескольких видов инструментальных сплавов.



В условиях практического применения, в тех случаях, когда качество поверхности детали не имеет заданных условий, в том числе при черновой обработке, за критерий износа принимают износ по задней поверхности. При этом при чистовой обработке деталей устанавливается величина износа по задней поверхности, в соответствии с техническими условиями, превышение которой приводит к неудовлетворительной точности и шероховатости обработанной поверхности.

**Проведение эксперимента.** Оценка вероятности отказа инструмента производится авторами при черновой обработке детали «Вал» из прутка диаметром 58 мм из сплава ХН77ТЮР. Деталь предназначена для электропривода, который используется для управления рабочими органами запорной арматуры магистральных нефтепродуктопроводов.

Деталь имеет простую форму что позволяет, при черновой обработке, не устанавливать ограничения на угол при вершине и главный угол в плане. Следовательно, может быть использован инструмент с различными параметрами державок с применением различных форм пластин для черновой обработки любой поверхности рассматриваемой детали.

В ходе производственного эксперимента обработка детали велась сборным режущим инструментом со СМП круглой и квадратной формы, имеющим по типу специальное исполнение из сплавов: ВК6м, ВК8 и Т15К6. Пластины круглой формы с рычажным типом крепления и креплением винтом имеют следующие параметры: главный задний угол  $\alpha = 7^\circ$ , главный передний угол  $\gamma$  и угол наклона режущей кромки  $\lambda$  равны  $0^\circ$ , угол при вершине  $\varepsilon = 180^\circ$ , главный угол в плане  $\varphi = 1^\circ$ , радиус при вершине составляет 10 мм. Квадратные пластины имеют главный задний угол  $\alpha = 7^\circ$ , главный передний угол  $\gamma$  и угол наклона режущей кромки  $\lambda$  равны  $0^\circ$ , угол при вершине  $\varepsilon = 90^\circ$ , главный угол в плане  $\varphi = 45^\circ$ , радиус при вершине составляет 0,4 мм, тип крепления — прижим рычагом через отверстие.

Каждым сборным инструментом в ходе исследования осуществлялась черновая обработка детали с применением 20 одинаковых пластин до их затупления или выхода из строя. За критерий затупления был принят износ по задней поверхности, равный 0,3 мм. Количество деталей, обработанных каждой пластиной, и схемы базирования сборного режущего инструмента представлены в табл. 1. Указанные выше параметры режущего инструмента представлены в соответствии с условными обозначениями, принятыми в стандартах: ГОСТ Р 59472 — 2021 (ИСО 5608:2012) [8] и ГОСТ 19042 — 80 (ИСО 1832 — 85) [9].

**Обсуждение эксперимента.** Для оценки полученных результатов и описания распределения экспериментальных данных в ходе исследования авторами используется критерий согласия Шапиро — Уилка. Параметрический тест Шапиро — Уилка считается одним из наиболее распространенных критериев проверки корреляции между исходными данными и соответствующим предположением об их нормальном распределении [10, 11]. Данный критерий относится к специальным критериям согласия и надежно работает для малой выборки  $x_i$ ,  $i = 1, n$ , которая находится в диапазоне  $8 \leq n \leq 50$ . При этом выборка должна быть представлена в виде вариационного ряда в порядке возрастания значений от  $x_{\min}$  до  $x_{\max}$ .

Статистика критерия Шапиро — Уилка определяется по формуле:

$$W = \frac{b^2}{D^2}, \quad (1)$$

$$\text{где } D^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2, \quad (2)$$

коэффициент  $b$  вычисляется по зависимости:

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i). \quad (3)$$

Для расчета зависимости (3) берутся значения коэффициентов  $a_{n-i+1}$ , представленных в стандарте ГОСТ Р ИСО 5479 — 2002 [10], при этом если  $n$  является четным числом, то

$$k = n/2. \quad (4)$$

В том случае, если значение выборки  $n$  является нечетным числом, то

$$k = (n - 1)/2. \quad (5)$$

Коэффициенты, используемые для проверки гипотезы о нормальности распределения с помощью критерия  $W$ , представлены в справочных таблицах стандарта [10].

Гипотеза о подчинении распределения случайной величины  $x$  нормальному закону распределения принимается в том случае, если выполняется условие:

$$W \geq W_{\alpha'} \quad (6)$$

где  $W_{\alpha'}$  — критическое значение критерия Шапиро — Уилка при уровне значимости  $\alpha$ . Данное критическое значение зависит не только от уровня значимости  $\alpha$ , но и от объема выборки  $n$ . Величина  $W_{\alpha'}$  приводится в справочных таблицах [12, 13] для значений  $\alpha = 0,01$ ,  $\alpha = 0,05$  и  $\alpha = 0,10$ .

В ходе анализа данных, полученных в данном исследовании, уровень значимости  $\alpha$ , который представляет вероятность допущения ошибки первого рода, принят  $\alpha = 0,05$ . Обработка полученных результатов работы сборного режущего инструмента с СМП с использованием критерия Шапиро — Уилка осуществлялась в программном обеспечении Mathcad при сравнении линейной комбинации разности порядковых статистик. Полученные значения  $W$ , а также размер выборки  $n$ , вероятность допущения ошибки  $\alpha$  и критическое значение Шапиро — Уилка представлены в табл. 2.

Исходя из полученных результатов, представленных в таблице, гипотеза о подчинении распределения величины выборки нормальному закону и соблюдение неравенства  $W \geq W_{\alpha'}$ , выполняется для значений  $n \leq 8$ . При этом для выборки  $n = 20$  эмпирическое распределение не соответствует нормальному закону.

Так как для авторов наибольший интерес представляют результаты работы сборного режущего инструмента до достижения критерия затупления без поломки пластины и деформации опорной поверхности, необходимо оценить риск потери его работоспособности до предельного значения количества обработанных деталей.

Данные, полученные по результатам производственных испытаний, не подчиняются нормальному закону распределения и имеют небольшой объем, в связи с чем применение стандартных методов

Результаты расчета критерия Шапиро–Уилка

№ п/п	Обозначение инструмента и пластины	Вероятность допущения ошибки, $\alpha$	Выборка, $n$	Значение критерия Шапиро–Уилка, $W$	Критическое значение критерия Шапиро–Уилка, $W_\alpha$	Соблюдение условия $W \geq W_\alpha$
1	PRDCN – 4040S20 (12227 – 2006 M03 сплав BK6M)	0,05	20	0,903	0,905	нет
2	PRDCN – 4040S20 (12227 – 2006 M03 сплав BK8)	0,05	20	0,850	0,905	нет
3	PRDCN – 4040S20 (12227 – 2006 M03 сплав T15K6)	0,05	8	0,835	0,818	да
4	SRDCN – 4040S20 (12227 – 2006 M03 сплав BK6M)	0,05	20	0,839	0,905	нет
5	SRDCN – 4040S20 (12227 – 2006 M03 сплав BK8)	0,05	20	0,768	0,905	нет
6	SRDCN – 4040S20 (12227 – 2006 M03 сплав T15K6)	0,05	20	0,751	0,905	нет
7	SRDCN – 4040S20 – M (12227 – 2006 M03 сплав BK6M)	0,05	20	0,795	0,905	нет
8	SRDCN – 4040S20 – M (12227 – 2006 M03 сплав BK8)	0,05	20	0,703	0,905	нет
9	SRDCN – 4040S20 – M (12227 – 2006 M03 сплав T15K6)	0,05	20	0,769	0,905	нет
10	PSDCN – 4040S19 (03227 – 1906 043 сплав BK6M)	0,05	5	0,929	0,672	да
11	PSDCN – 4040S19 (03227 – 1906 043 сплав BK8)	0,05	9	0,786	0,829	нет
12	PSDCN – 4040S19 (03227 – 1906 043 сплав T15K6)	0,05	7	0,867	0,803	да

параметрической статистики не представляется возможным. Поэтому необходимо провести восстановление неизвестной функции плотности распределения и выбрать оптимальное значение параметра размытости (ширины окна) в ходе обработки данных с применением методов непараметрической статистики.

С учетом того, что малые выборки с  $n \leq 8$  при обнаружении отклонений от нормального распределения не дают достоверных результатов, для дальнейшего анализа с помощью методов непараметрической статистики будем использовать данные, представленные в табл. 2, с размером выборки  $n \geq 8$  и которые не подчиняются нормальному распределению, т.е. не выполняется условие  $W \geq W_\alpha$ .

Оценка вероятности отказа сборного режущего инструмента на основе математического аппарата непараметрической статистики, в ходе обработки данных эксперимента, связаны с компьютерным моделированием случайных величин, где принимается, что искомая функция с точностью до конечного числа параметров известна. Также ставится задача восстановления по заданной выборке случайной величины ее функции плотности распределения [14].

На сегодняшний день в математической статистике исследовано большое количество законов распределения случайных величин. При этом результаты обработки экспериментальных данных, полученных опытным путем в различных отраслях, свидетельствует о том, что в большинстве случаев распределения ряда случайных величин не подчиняются стандартным законам, описанным в рамках теории параметрической статистики. Это указывает на необходимость привлечения робастных методов, нечеткой логики или непараметрической статистики [15].

При обработке экспериментальных данных в задачах восстановления неизвестной функции плотности распределения случайных величин наибольшее распространение получили методы непараметрической статистики, в основе которых используются либо метод разложения по базисным функциям [16, 17], либо оценка Парзена – Розенблатта [18]. В данном исследовании при оценке риска отказа сборного режущего инструмента авторами предложено использовать непараметрический метод Парзена – Розенблатта.

В методах оценки функции плотности распределения, предложенных Парзеном и Розенблаттом

[19], используется smoothed эмпирическая функция распределения в виде:

$$F_N(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G\left(\frac{y - x_i}{h_N}\right), \quad (7)$$

где  $G(t)$  — монотонно неубывающая функция от 0 до 1 своего аргумента, при этом  $G(t) = 1 - G(-t)$ , то есть  $G(t)$  — функция симметричная относительно нуля;  $h_N$  — параметр размытости.

После дифференцирования (7) получим:

$$\begin{aligned} P_N(y) = F'_N(y) &= \frac{1}{N \cdot h_N} \sum_{i=1}^N G'\left(\frac{y - x_i}{h_N}\right) = \\ &= \frac{1}{N \cdot h_N} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{y - x_i}{h}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $K(t) = G'(t)$  — плотность распределения  $G(t)$ , или ядерная функция (ядро).

Решение задачи восстановления функции плотности распределения методом Парзена–Розенблатта на основе (8) выполняется в два этапа. На первом этапе выбирается ядерная функция  $K(t)$  из числа известных (табл. 1). На втором этапе решается задача определения оптимальной величины параметра размытости  $h_N$ .

Имеющиеся на сегодняшний день исследования функции (7) свидетельствуют о том, что смещение и вариация оценки (8) зависят от вида ядра  $K(t)$  и значения параметра размытости  $h_N$ . В качестве ядерных функций используются различные зависимости, но наиболее универсальным является нормальное ядро:

$$K\left(\frac{y - x_i}{h_N}\right) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \exp\left[-0,5\left(\frac{y - x_i}{h_N}\right)^2\right]. \quad (9)$$

Определение оптимальной величины  $h_N$  является более сложной задачей, чем восстановление плотности распределения, поскольку оптимальное значение  $h_N$  зависит от неизвестной плотности распределения [20]. Для решения задач, возникающих в производственной деятельности, интерес может представлять лишь часть плотности распределения, отличная от средних или оптимальных значений. Так, для оценки вероятности отказа сборного режущего инструмента, наибольший интерес представляет левый хвост распределения, поскольку именно значительное снижение количества обработанных деталей каждой пластиной указывает на низкую производительность инструмента с заданными геометрическими параметрами в целом.

Поэтому для решения данной задачи авторами разработан алгоритм, обеспечивающий определение оптимального значения параметра  $h_N$  на основе лишь имеющейся выборки  $x_i, i = \overline{1, N}$  случайной величины  $X$ . Начальное оптимальное значение параметра  $h_N$  («ширины окна») в случае использования нормального ядра, задается формулой:

$$h_N^* = D_N \cdot N^{-0,2}, \quad (10)$$

где  $D_N$  — выборочная дисперсия, рассчитываемая на основе имеющейся выборки значений  $x_i, i = \overline{1, N}$ :

$$D_N^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i\right)^2. \quad (11)$$

Результаты оценки методом Парзена–Розенблатта

№ п/п	Выборка, n	Медиана 50 %, дет.	Квантиль 20 %, дет.	Вероятность отказа ≤ 50 дет., %
1	20	52	30	46,92
2	20	79	47	23,15
3	8	42	27	63,13
4	20	62	47	21,87
5	20	95	71	0,45
6	20	50	19	45,9
7	20	0	0	0
8	20	0	0	0
9	20	0	0	5

В работе [16] представлены результаты верификации задачи восстановления методами непараметрической статистики функции плотности распределения случайной величины, имеющей нормальный закон распределения, путем сопоставления значений квантильных оценок случайной величины на левом и правом хвостах распределения. Данные результаты свидетельствуют, что погрешности этих оценок, рассчитанных параметрическими и непараметрическими методами статистики, в диапазоне длины выборки от 20 до 2000 значений являются величинами одного порядка. Это позволяет применять методы непараметрической статистики для решения задач, оперирующими небольшими выборками, но характеризующихся высокой важностью и ответственностью при принятии решений.

В данном исследовании по результатам работы сборного режущего инструмента со сменными многогранными пластинами авторами произведена оценка риска снижения его работоспособности, где в качестве предельного значения количества обработанных деталей одной пластиной для расчета вероятности отказа, исходя из расчетных показателей, принято значение 50 деталей, для каждого инструмента в соответствии с его параметрами.

**Основные результаты и выводы.** Результаты производственного эксперимента выявили приемлемые показатели работы сборного режущего инструмента со сменными пластинами круглой формы как с креплением рычажным прижимом, так и с типом крепления винтом. При этом инструмент с пластинами квадратной формы показал себя намного хуже, не достигнув предельного значения количества обработанных деталей. Поэтому для дальнейшего расчета вероятности отказа по данным исследования для выборки, которая не подчиняется нормальному закону распределения, а также квантильные оценки, вычисленные посредством численного интегрирования, представлены для сборного режущего инструмента со сменными многогранными пластинами круглой формы (табл. 3).

Квантильные оценки, вычисленные посредством численного интегрирования, показывают, какое количество деталей будет обработано и с какой вероятностью произойдет отказ инструмента на данном этапе. Так, с вероятностью 20 % инструментом № 2 будет обработано 47 деталей до выхода его из строя, инструментом № 5 будет обработана

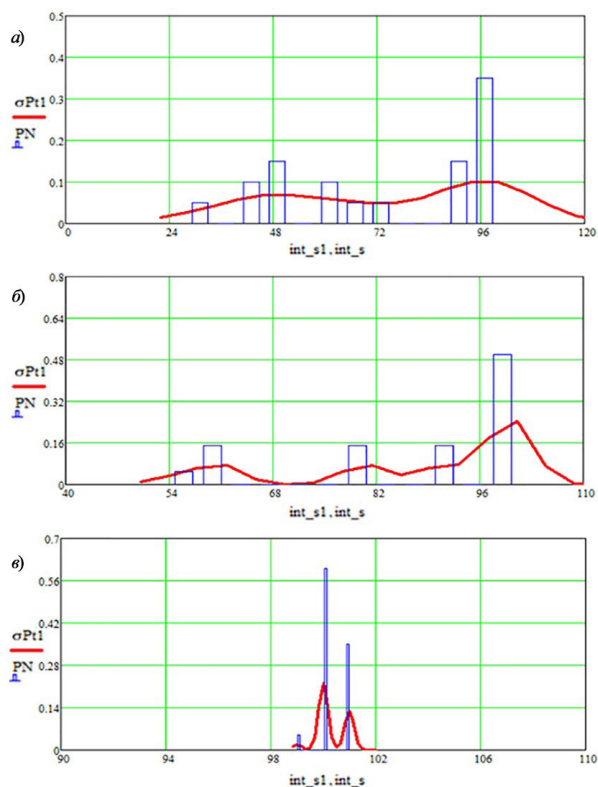


Рис. 1. Функция плотности распределения работы сборного режущего инструмента

71 деталь, а инструментами SRDCN-4040S20-M (RCMX 2006 MOS) с пластинами из сплавов BK6м, BK8 и T15K6 будет обработано количество деталей, значительно превышающее критическое значение. В данном случае риск может быть идентифицирован как возможность. На основе полученной информации можно принимать решение о выборе инструмента с определенной геометрией и из соответствующего сплава.

На основе с результатов, полученных в ходе восстановления функции плотности распределения (ФПР) методом Парзена–Розенблатта и определения оптимальной величины параметра размытости, представленными в табл. 3, проведено компьютерное моделирование. Гистограмма и восстановленная ФПР для сборного режущего инструмента со сменными многогранными пластинами представлены на рис. 1 для инструмента: а) PRDCN-4040S20 (12227–2006 M03 сплав BK8), б) SRDCN-4040S20 (12227–2006 M03 сплав BK8), в) SRDCN-4040S20-M (12227–2006 M03 сплав BK8), показавшие в своей группе наилучшие результаты (рис. 1).

Как можно заметить, представленная на рис. 1 функция плотности распределения является несимметричной, и ее форма не подчиняется законам нормального распределения. При этом вид ФПР для режущего инструмента с разными параметрами значительно отличается.

Полученные авторами результаты в ходе применения методов математического моделирования помогают оценить вероятность отказа режущего инструмента и сделать выводы о приемлемости его применения на определенной операции.

#### Библиографический список

1. Артамонов Е. В., Василега Д. С., Трифионов В. Б. Выбор инструментального твердого сплава по обрабатываемому

материалу на основе физико-механических характеристик. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. нефтегазового ун-та, 2010. 127 с.

2. Зорин В. А., Пегачков А. А. Оценка надежности и рисков изделий машиностроения по результатам диагностирования // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 2. С. 37–43.

3. Liang X., Liu. Z., Wang B. Multi-pattern failure modes and wear mechanisms of WC-Co tools in dry turning Ti-6Al-4V // CERAMICS International. 2020. Vol. 15, no. 46. P. 24512–24525. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.06.238.

4. Inta M., Muntean A. Researches regarding introducing temperature as a factor in cutting tool wear monitoring // 22nd International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy (IManE&E). 2018. Vol. 178 (7-8). 01013. DOI: 10.1051/mateconf/201817801013.

5. Артамонов Е. В., Василега Н. А. Методика оценки рисков и возможностей при эксплуатации сборных режущих инструментов // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2021): сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящен. памяти А-ра техн. наук, проф. Рахимьянова Хариса Магсумановича / под ред. С. И. Василевской, Ю. С. Кудрявцевой. Новосибирск, 2021. С. 137–142.

6. Артамонов Е. В., Василега Д. С. Анализ возможности применения зависимостей физико-механических характеристик материалов от температуры для определения температуры максимальной обрабатываемости материала // Омский научный вестник. 2008. № 4 (73). С. 56–58.

7. Василега Н. А. Факторы, влияющие на работоспособность металлорежущих инструментов // Научный потенциал молодежных исследований: сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 2021. С. 19–23.

8. ГОСТ Р 59472–2021 (ИСО 5608:2012). Резцы токарные и копируемые и резцы-вставки с механическим креплением сменных многогранных пластин. Обозначение. Введ. 2021–04–29. Москва: Стандартинформ, 2021. 15 с.

9. ГОСТ 19042–80 (ИСО 1832–85). Пластины сменные многогранные. Классификация. Система обозначений. Формы. Введ. 1982–01–01. Москва: Стандартинформ, 2006. 19 с.

10. ГОСТ Р ИСО 5479–2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. Введ. 2002–07–01. Москва: Госстандарт России, 2002. 31 с.

11. Большой Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. Москва: Наука, 1983. 436 с.

12. Александровская Л. Н., Кириллин А. В., Кербер О. Б. Выбор ряда критериев проверки отклонения распределения вероятностей от нормального закона в практике инженерного статистического анализа // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2017. № 1. С. 42–52.

13. Shapiro S. S., Wilk M. B. An analysis of variance test for normality // Biometrika. 1965. Vol. 52, № 3. P. 591–611.

14. Воронов И. В., Мухометзянов Р. Н., Краснова А. А. Выбор ширины окна при аппроксимации плотности распределения вероятности методом Парзена–Розенблатта в случае малого объема выборки // Радиоэлектронная техника. 2016. № 1 (9). С. 93–98.

15. Сызранцев В. Н., Невелев Я. П., Голофаст С. Л. Расчет прочностной надежности изделий на основе методов непараметрической статистики: моногр. Новосибирск: Наука, 2008. 218 с. ISBN 978-5-02-032151-9.

16. Поршнев С. В., Копосов А. С., Березовик Е. И. Сравнительный анализ методов Розенблатта–Парзена и структурной минимизации риска для аппроксимации плотностей вероятностей случайных величин // Cloud of Science. 2019. Т. 6, № 2. С. 186–200.

17. Никулин В. С., Пестунов А. И. Аппроксимация плотности распределения времени работы между отказами вычислительной системы непараметрическим методом Розенблатта–Парзена // Вестник Воронежского государственного

технического университета. 2022. Т. 18, № 1. С. 36–41. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.1.004.

18. Сызранцев В. Н., Антонов М. Д. Восстановление функции плотности распределения предельных напряжений материала газопровода на основе значений их квантильных оценок // Газовая промышленность. 2020. № 12 (810). С. 86–93.

19. Сызранцев В. Н., Сызранцева К. В. Обработка данных многоцикловых испытаний на основе кинетической теории усталости и методов непараметрической статистики: моногр. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального ун-та, 2015. 135 с. ISBN 978-5-9961-1148-0.

20. Сызранцева К. В., Ильиных В. Н., Колбасин Д. С. Оценка вероятности отказа редуктора системы верхнего привода буровой установки с учетом режима его эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Нефть и Газ. 2019. № 3 (135). С. 127–134. DOI: 10.31660/0445-0108-2019-3-127-134.

---

**СЫЗРАНЦЕВА Ксения Владимировна**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры кибернетических систем Тюменского индустриального университета (ТИУ), г. Тюмень.  
SPIN-код: 6025-3484  
AuthorID (РИНЦ): 146813

ORCID: 0000-0002-9616-4661

AuthorID (SCOPUS): 503929784

ResearcherID: K-7962-2019

Адрес для переписки: v.syzr@gmail.com

**ВАСИЛЕГА Наталья Александровна**, ассистент кафедры «Станки и инструменты» ТИУ, г. Тюмень.

Адрес для переписки: natashavasilega@mail.ru

SPIN-код: 4013-6572

AuthorID (РИНЦ): 947674

ORCID: 0000-0002-9761-3342

AuthorID (SCOPUS): 57202383857

ResearcherID: НКV-9290-2023

Адрес для переписки: natashavasilega@mail.ru

#### Для цитирования

Сызранцева К. В., Василега Н. А. Оценка вероятности отказа при эксплуатации сборного режущего инструмента со сменными многогранными пластинами методами непараметрической статистики // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 35–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-35-43.

Статья поступила в редакцию 01.02.2023 г.

© К. В. Сызранцева, Н. А. Василега

## ESTIMATION OF THE PROBABILITY OF FAILURE DURING OPERATION OF A PREFABRICATED CUTTING TOOL WITH REPLACEABLE POLYHEDRAL PLATES BY NONPARAMETRIC STATISTICS METHODS

The article discusses the issues of durability of a prefabricated cutting tool in the process of metal cutting, as well as the risk of loss of its operability. In the course of assessing the probability of tool failure in violation of the established wear criterion, the results of a production experiment are used when roughing the Shaft part made of a rod with a diameter of  $\varnothing$  58 mm made of HN77TYUR alloy. The processing of the part is carried out with a prefabricated cutting tool with replaceable polyhedral plates of round and square shape, having a special type of alloys: VK6m, VK8 and T15K6. To evaluate the results obtained and describe their distribution, the authors use the Shapiro–Wilk agreement criterion to check the correlation between the initial data and the corresponding assumption of their normal distribution. Since the obtained production test data do not obey the normal distribution law, the nonparametric Parsen–Rosenblatt method is used for further analysis.

**Keywords:** prefabricated cutting tool, replaceable polyhedral plates, operability, failure probability, Shapiro–Wilk agreement criterion, nonparametric statistics, Parsen–Rosenblatt method, distribution density function.

### References

1. Artamonov E. V., Vasilega D. S., Trifonov V. B. Vybor instrumental'nogo tverdogo splava po obrabatyvayemomu materialu na osnove fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik [Selection of tool hardness according to the material to be machined, based on physical and mechanical properties]. Tyumen, 2010. 127 p. (In Russ.).
2. Zorin V. A., Pegachkov A. A. Otsenka nadezhnosti i riskov izdeliy mashinostroyeniya po rezul'tatam diagnostirovaniya [Assessment of reliability and risks of products of mechanical engineering by results of diagnosing] // Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii. *Engineering and Automation Issues*. 2020. No. 2. P. 37–43. (In Russ.).
3. Liang X., Liu. Z., Wang B. Multi-pattern failure modes and wear mechanisms of WC-Co tools in dry turning Ti-6Al-4V // CERAMICS International. 2020. Vol. 15, no. 46. P. 24512–24525. DOI:10.1016/j.ceramint.2020.06.238. (In Engl.).
4. Inta M., Muntean A. Researches regarding introducing temperature as a factor in cutting tool wear monitoring // 22nd International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy (IManE&E). 2018. Vol. 178 (7-8). 01013. DOI: 10.1051/mateconf/201817801013. (In Engl.).
5. Artamonov E. V., Vasilega N. A. Metodika otsenki riskov i vozmozhnostey pri ekspluatatsii sbornykh rezhushchikh instrumentov [Methodology for assessing risks and opportunities in the operation of prefabricated cutting tools] // Innovatsii v mashinostroyenii (InMash-2021). *Innovation in Mechanical Engineering (InMash-2021)* / Ed. by S. I. Vasilevskoy, Yu. S. Kudryavtsevov. Novosibirsk, 2021. P. 137–142. (In Engl.).
6. Artamonov E. V., Vasilega D. S. Analiz vozmozhnosti primeneniya zavisimostey fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik materialov ot temperatury dlya opredeleniya temperatury maksimal'noy obrabatyvayemosti materiala [Analysis of the possibility of applying temperature dependences of the physical-mechanical characteristics of materials to determine the temperature of maximum machinability of the material] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2008. No. 4 (73). P. 56–58. (In Russ.).
7. Vasilega N. A. Faktory, vliyayushchiye na rabotosposobnost' metallorezhushchikh instrumentov [Factors affecting the performance of metal-cutting tools] // Nauchnyy potentsial molodezhnykh issledovaniy. *Scientific Potential of Youth Research*. Petrozavodsk, 2021. P. 19–23. (In Russ.).
8. GOST R 59472–2021 (ISO 5608:2012). Reztsy tokarnyye i kopiroval'nyye i reztsy-vstavki s mekhanicheskim krepleniym smennykh mnogogrannykh plastin. Oboznacheniyе [Turning and copying tool holders and cartridges for indexable inserts. Designation]. Moscow, 2021. 15 p. (In Russ.).
9. GOST 19042–80 (ISO 1832–85). Plastiny smennyye mnogogrannyye. Klassifikatsiya. Sistema oboznacheniy. Formy [Throw-away (indexable) inserts. Classification. Notation. Forms]. Moscow, 2006. 19 p. (In Russ.).
10. GOST R ISO 5479–2002. Statisticheskiye metody. Proverka otkloneniya raspredeleniya veroyatnostey ot normal'nogo raspredeleniya [Statistical methods. Tests for departure of the

probability distribution from the normal distribution]. Moscow, 2002. 31 p. (In Russ.).

11. Bol'shev L. N., Smirnov N. V. *Tablitsy matematicheskoy statistiki* [Mathematical statistics tables]. Moscow, 1983. 436 p. (In Russ.).

12. Aleksandrovskaya L. N., Kirillin A. V., Kerber O. B. *Vybor ryada kriteriyev proverki otkloneniya raspredeleniya veroyatnostey ot normal'nogo zakona v praktike inzhenerenogo statisticheskogo analiza* [Selection of a number of criteria for checking the deviation of the probability distribution from the normal law in the practice of statistical engineering analysis] // *Trudy FGUP «NPTSAP». Sistemy i pribory upravleniya. Trudy FGUP «NPTSAP». Sistemy i Pribory Upravleniya*. 2017. No. 1. P. 42–52. (In Russ.).

13. Shapiro S. S., Wilki M. B. An analysis of variance test for normality // *Biometrika*. 1965. Vol. 52, no. 3. P. 591–611. (In Engl.).

14. Voronov I. V., Mukhometzyanov R. N., Krasnova A. A. *Vybor shiriny okna pri approksimatsii plotnosti raspredeleniya veroyatnosti metodom Parzena-Rozenblatta v sluchaye malogo ob'yema vyborki* [Selection of window width when approximating probability density functions by the Parzen-Rosenblatt method in the case of small sample sizes] // *Radioelektronnaya tekhnika. Radio-electronic Engineering*. 2016. No. 1 (9). P. 93–98. (In Russ.).

15. Syzrantsev V. N., Nevelev Ya. P., Golofast S. L. *Raschet prochnostnoy nadezhnosti izdeliy na osnove metodov neparametricheskoy statistiki* [Calculation of the strength reliability of products based on non-parametric statistical methods]. Novosibirsk, 2008. 218 p. ISBN 978-5-02-032151-9. (In Russ.).

16. Porshnev S. V., Kuposov A. S., Berezovik E. I. *Sravnitel'nyy analiz metodov Rozenblatta-Parzena i strukturnoy minimizatsii riska dlya approksimatsii plotnostey veroyatnostey sluchaynykh velichin* [Comparative analysis of Rosenblatt–Parzen method and structural risk minimization method for approximation of the probability density functions of random variables] // *Cloud of Science. Cloud of Science*. 2019. Vol. 6, no. 2. P. 186–200. (In Russ.).

17. Nikulin V. S., Pestunov A. I. *Approksimatsiya plotnosti raspredeleniya vremeni raboty mezhdu otkazami vychislitel'noy sistemy neparametricheskimi metodami Rozenblatta-Parzena* [Approximation of the distribution density of time between failures of a computing system by the Rosenblatt–Parzen nonparametric method] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2022. Vol. 18, no. 1. P. 36–41. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.1.004. (In Russ.).

18. Syzrantsev V. N., Antonov M. D. *Vosstanovleniye funktsii plotnosti raspredeleniya predel'nykh napryazheniy materiala*

*gazoprovoda na osnove znacheniy ikh kvantil'nykh otsenok* [Restoring the density function of ultimate stresses distribution in gas pipeline material based on their quantile estimates] // *Gazovaya promyshlennost'. Gazovaya Promyshlennost'*. 2020. No. 12 (810). P. 86–93. (In Russ.).

19. Syzrantsev V. N., Syzrantseva K. V. *Obrabotka dannykh mnogotsiklovyykh ispytaniy na osnove kineticheskoy teorii ustalosti i metodov neparametricheskoy statistiki* [Data processing of multi-cycle tests based on the kinetic theory of fatigue and methods of nonparametric statistics]. Tyumen, 2015. 135 p. ISBN 978-5-9961-1148-0. (In Russ.).

20. Syzrantseva K. V., Il'inykh V. N., Kolbasin D. S. *Otsenka veroyatnosti otkaza reduktora sistemy verkhnego privoda burovoy ustanovki s uchetom rezhima yego ekspluatatsii* [Assessing the failure probability of gearhead of drilling rig top drive system taking into account the mode of its operation] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i Gaz. Oil and Gas Studies*. 2019. No. 3 (135). P. 127–134. DOI: 10.31660/0445-0108-2019-3-127-134. (In Russ.).

**SYZRANTSEVA Kseniya Vladimirovna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Cyber Systems Department, Industrial University of Tyumen (IUT), Tyumen.

SPIN-code: 6025-3484

AuthorID (RSCI): 146813

ORCID: 0000-0002-9616-4661

AuthorID (SCOPUS): 503929784

ResearcherID: K-7962-2019

Correspondence address: v.syzr@gmail.com

**VASILEGA Natalya Aleksandrovna**, Assistant of Machines and Tools Department, IUT, Tyumen.

SPIN-code: 4013-6572

AuthorID (RSCI): 947674

ORCID: 0000-0002-9761-3342

AuthorID (SCOPUS): 57202383857

ResearcherID: HKV-9290-2023

Correspondence address: natashavasilega@mail.ru

#### For citations

Syzrantseva K. V., Vasilega N. A. Estimation of the probability of failure during operation of a prefabricated cutting tool with replaceable polyhedral plates by nonparametric statistics methods // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 35–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-35-43.

Received February 01, 2023.

© K. V. Syzrantseva, N. A. Vasilega

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ИЗГИБА ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ЕЕ ВАЛЬЦЕВАНИИ

В работе проводится анализ технологического процесса вальцевания листовой заготовки для получения цилиндрической обечайки большого диаметра. Анализ проведен на основе прочностных расчетов упругопластического изгиба листовой заготовки с учетом эффекта пружинения. Вычисление пружинения осуществлялось на основе имеющихся соотношений энергии пластических и упругих деформаций, формирующихся в материале листовой заготовки. Сделаны выводы и приведены практические рекомендации, которые можно использовать в процессе настройки технологических параметров вальцовочных станков.

**Ключевые слова:** цилиндрические оболочки, упругие и пластические деформации, радиус кривизны, энергия формирования упругих и пластических деформаций, технологические параметры вальцевания.

**Введение.** В настоящее время в различных отраслях промышленности широко используются технологические процессы, связанные с холодной обработкой металлов давлением, и в частности с листовой штамповкой. В основе данного способа обработки материала находится процесс пластического изменения формы заготовки, которая представляет собой: лист металла, полученный прокаткой; полосу или ленту, свернутую в рулон. Листовая штамповка в сочетании со сваркой позволяет получить различные по размерам и форме тонкостенные конструкции, которые не могут быть изготовлены иными способами. Такие узлы имеют высокую точность изготовления совместно с высоким качеством шероховатости и чистоты поверхности детали.

Однако для применения таких технологических процессов необходимо решить различные научно-технические задачи, связанные с определением параметров конструкций минимальной массы с требуемой несущей способностью. В работе [1] рассмотрены вопросы проектирования оболочечных конструкций минимальной массы с выбором материалов, расчетных схем, коэффициентов безопасности, критериев эффективности материалов, а также прочности данных тонкостенных конструкций. В работах [2–4] авторы рассматривают различные случаи сложного сопротивления, кривые стержни и оболочки, напряжения в толстостенных и тонкостенных сосудах различного типа. Вольмир А. С. в работе [5] изучает различные случаи расчета устойчивости сжатых стержней и стержневых систем, а также оболочек с учетом разнообразных ситуаций приложения нагрузки. Григолюк и др. [6] рассматривают неклассические теории колебаний стержней, пластин и оболочек. В работах [7, 8] Лы-

сов М. И. и др. систематизируют и обобщают исследования по процессам формообразования деталей из листового металла и профилей, используя полученные аналитические зависимости для определения кривизны и перемещения нейтрального слоя пластически изогнутого элемента при различных схемах нагружения. В публикациях [9, 10] авторы приводят методики расчетов определения силовых, настроечных и программируемых параметров гибочного оборудования, предназначенного для изготовления деталей из листового и профильного материалов с учетом геометрической нелинейности, формируемой технологическим процессом гибки. В работах [11–15] авторы рассматривают отдельные вопросы, связанные с технологией фрезерования и последующего вальцевания вафельных оболочек на основе различных методов обработки материала, исключающих деформацию заготовки в не жестко закрепленных местах с учетом формообразования заданной геометрической формы обрабатываемых конструктивных элементов.

В данной публикации будут рассмотрены вопросы, связанные с силовым расчетом технологического процесса вальцевания гладких пластин. В частности, будет рассмотрен эффект пружинения. Обозначения физических величин, принятые в данной статье, приведены в табл. 1.

**Постановка задачи.** Для изготовления цилиндрических или конических заготовок большого диаметра используют листы металла различной толщины. Под большим диаметром будем понимать диаметры изделий более 1,5 м.

Для формирования цилиндрической поверхности плоский прямоугольный лист металла помещают на два нижних вала трехвалкового станка

## Обозначения в формулах

Символы	Описание	Размерность
1	2	3
$F$	Сила прижатия упорного вала к заготовке	Н
$F_{1+\Delta}$	Сила прижатия упорного вала к заготовке с учетом пружинения	Н
$T$	Крутящий момент, вращающий подающие валки	Н·м
$r_i$	Радиусы соответствующих номеров валков	м
$\rho(z)$	Текущий радиус кривизны листовой заготовки	м
$q$	Распределённая нагрузка, изгибающая листовую заготовку	Н/м
$R_0, R_A, R_B$	Реакции опоры листовой заготовки и нижних валков	Н
$h$	Толщина листовой заготовки	м
$l$	Расстояние между центрами нижних валков	м
$L$	Длина изгиба листа заготовки	м
$E_1, E_2$	Модуль Юнга материала верхнего вала и листовой заготовки	Па
$\mu_1, \mu_2$	Коэффициент Пуассона материала верхнего вала и листовой заготовки	—
$b$	Ширина площадки контакта заготовки и верхнего вала	м
$n-n$	Текущее сечение заготовки, рис. 6	—
$Y(z)$	Уравнение поперечного изгиба заготовки, рис. 6	—
$f(z)$	Уравнение прогиба заготовки, рис. 6	—
$z$	Текущая координата поперечного сечения заготовки, рис. 6	м
$J_x$	Момент инерции площади поперечного сечения заготовки длиной $L$	м <sup>4</sup>
$a$	Координата точки приложения силы $F$	м
$\chi$	Коэффициент, связывающий величины $a$ и $l$	—
$\xi$	Коэффициент, связывающий величины $z$ и $l$	—
$W_x$	Осевой момент сопротивления площади поперечного сечения заготовки длиной $L$ при упругих деформациях	м <sup>3</sup>
$W_{\text{пл}}$	Осевой момент сопротивления площади поперечного сечения заготовки длиной $L$ при пластических деформациях	м <sup>3</sup>
$A_{\Sigma}$	Общая энергия формоизменения заготовки	Дж
$A_{\text{упр}}$	Энергия упругих деформаций при формоизменении заготовки	Дж
$A_{\text{пласт}}$	Энергия пластических деформаций при формоизменении заготовки	Дж
C	Углерод	
Mn	Марганец	
Cr	Хром	
W	Вольфрам	

1	2	3
V	Ванадий	
Cu	Медь	
Mg	Магний	
HRC	Твердость по шкале Роквелла	
HB	Твердость по шкале Бринеля	
$\sigma_{\text{щ}}$	Предел пропорциональности материала	МПа
$\sigma_{\text{в}}$	Предел прочности (временное сопротивление) материала	МПа
M1	Закаленная углеродистая инструментальная сталь	
M2	Частично отожженная инструментальная сталь	
M3	Отожженная инструментальная сталь	
M4	Дюралюминий, российский аналог Д16	
M5	Алюминий, российский аналог АДС (алюминий технический)	
M6	Прессованный свинец	



Рис. 1. Гидравлическая вальцовочная машина с ЧПУ для гибки листового металла



Рис. 2. Процесс вальцовки листового металла на вальцовочной машине с тремя роликками

(рис. 1 – 3). Вращательное движение в процессе работы данного станка сообщается только двум нижним рабочим валкам 3, которые при этом могут горизонтально сближаться или отдаляться друг от друга для изменения расстояния между продольными осями валков. Это необходимо для изменения диаметра, формируемой цилиндрической поверхно-

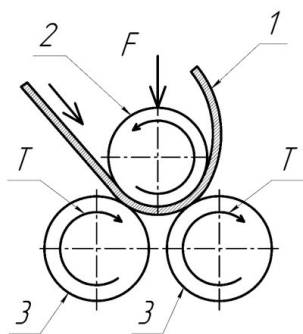


Рис. 3. Условная схема вальцовки листового металла на вальцовочной машине с тремя роликами:  
1 — листовая заготовка, 2 — верхний (упорный) валок, 3 — нижние (подающие) валки

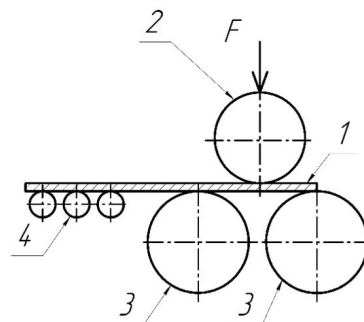


Рис. 4. Установка заготовки на станок: 4 — дополнительные (поддерживающие заготовку) валки

сти. Верхний валок данного станка 2, который называется упорным, совершает свое вращение за счет сил трения, возникающих между его поверхностью и поверхностью обрабатываемого листа металла.

Данный валок обладает возможностью перемещаться в вертикальном направлении, прижимая заготовку к нижним валкам с заданным усилием. Дополнительно верхний валок может откидываться в сторону для освобождения готового изделия, а также для быстрой его замены на валок другого диаметра для получения изделия с другими геометрическими параметрами.

На практике производственные предприятия не проектируют вальцовочное оборудование самостоятельно, а приобретают его у специализированных отечественных и зарубежных производителей. Примерные технические и технологические рекомендации производителей по выбору параметров настройки станков для производства конкретной продукции во многих случаях не подходят. Поэтому покупателю станков приходится подбирать их оптимальные режимы настройки методом проб и ошибок для получения минимальных остаточных напряжений, заданной кривизны и других требуемых параметров выпускаемой продукции.

В процессе вальцевания листа металла формируется так называемый «эффект пружинения». Углом пружинения при гибке листового материала или профилей называется угол, на который разгибается согнутая до заданного радиуса кривизны заготовки за счет упругости материала после снятия нагрузки. Величина угла пружинения зависит от геометрических, прочностных, силовых и иных факторов, действующих в процессе вальцевания заготовки. На практике технологические процессы учета эффекта пружинения хорошо отработаны опытным путем для вальцевания труб по причине их массового производства.

Изготовление цилиндрических заготовок диаметрами более 1,5 м встречается значительно реже, так как продукция машиностроения, использующая такие комплектующие, как правило, относится к мелкосерийному или индивидуальному производству. Поэтому технологические ошибки при вальцевании таких заготовок могут привести к дорогостоящему браку продукции.

В данной работе для компенсации эффекта пружинения в процессе вальцевания листовой заготов-

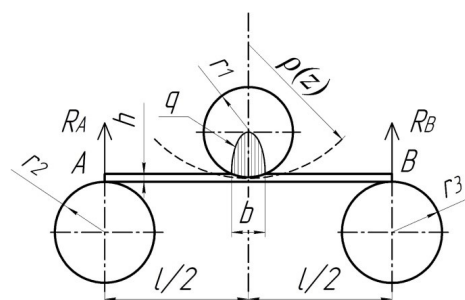


Рис. 5. Расчетная схема подгибки кромки листа

ки предлагается рассмотреть соотношения величин энергий упругих и пластических деформации материала заготовки, которые формируются в зонегиба.

**Теория.** Для решения поставленной задачи необходимо разделить операцию вальцевания на несколько этапов. В данной статье будет рассмотрен первый этап — установка заготовки на станок и гибка кромки листа (рис. 4).

На данном этапе рассматриваемой операции вальцевания на плоском листе заготовки необходимо сформировать изгиб ее правого края. В этой зоне будет находиться продольный сварочный шов, необходимый для изготовления цилиндрической оболочки (рис. 4).

Непосредственно изгиб заготовки происходит за счет контактных напряжений и деформаций, возникающих при нажатии упорного валка 2 на верхнюю поверхность листа 1. Однако данные напряжения зависят от упругих свойств материала и не являются линейной функцией нагрузки, так как с увеличением нагрузки увеличиваются размеры площадки контакта. В справочнике [16] приведено выражение (1) для расчета размера полосы контакта цилиндра и цилиндрической впадины с параллельными осями (рис. 5).

$$b = 2,256 \times \sqrt{\frac{F}{L} \frac{r_1 \rho(z)}{\rho(z) - r_1} \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}. \quad (1)$$

Для определения размеров  $b$  используем данные физических свойств материалов, приведенные в публикации [17] и в табл. 2 и табл. 3. В качестве материала валков примем закаленную углеродистую

Физические характеристики материалов для определения ширины зоны действия контактных напряжений Герца [17]

Материал	$E, 1 \cdot 10^5$ МПа	$\sigma_{\text{нп}},$ МПа	$\sigma_{\text{в}},$ МПа	$\mu$	Твердость	Легирующие элементы, %				
						C 0,90	Mn 1,20	Cr 0,50	W 0,50	V 0,20
M1	2,041	937,7	1245	0,286	60-64 HRC	C 0,90	Mn 1,20	Cr 0,50	W 0,50	V 0,20
M2	2,041	489,5	970	0,286	17-32 HRC	C 0,90	Mn 1,20	Cr 0,50	W 0,50	V 0,20
M3	2,041	206,8	655	0,286	6-12 HRC	C 0,90	Mn 1,20	Cr 0,50	W 0,50	V 0,20
M4	0,731	365,4	477	0,33	74 НВ	Cu 0,90	Mn 1,20	Mg 0,50	—	—
M5	0,731	82,7	132	0,33	24 НВ	Нет данных				
M6	0,237	8,3	9,03	0,45	Нет данных					

Таблица 3

Физические характеристики расчетных величин для определения ширины зоны действия контактных напряжений Герца

Параметр	Величина параметра	Параметр	Величина параметра
$L$	4000 мм = 4 м	$F$	20000 Н
$r_1$	320 мм = 0,32 м	$\rho$	1500 мм = 1,5 м
$l$	500 мм = 0,5 м		

инструментальную сталь (M1). В качестве материала заготовки рассмотрим все виды материалов, приведенные в табл. 2.

1. M1 и M1.

$$b = 2,256 \times \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4}{4} \frac{0,32 \cdot 1,5}{(1,5 - 0,32)} \times \left( \frac{1 - 0,286^2}{2,04 \cdot 10^{11}} + \frac{1 - 0,286^2}{2,04 \cdot 10^{11}} \right)} = 0,118 \text{ мм.}$$

2. M1 и M2.

$$b = 2,256 \times \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4}{4} \frac{0,32 \cdot 1,5}{(1,5 - 0,32)} \times \left( \frac{1 - 0,286^2}{2,04 \cdot 10^{11}} + \frac{1 - 0,286^2}{2,04 \cdot 10^{11}} \right)} = 0,118 \text{ мм.}$$

3. M1 и M3.

$$b = 2,256 \times \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4}{4} \frac{0,32 \cdot 1,5}{(1,5 - 0,32)} \div \left( \frac{1 - 0,286^2}{2,04 \cdot 10^{11}} + \frac{1 - 0,286^2}{2,04 \cdot 10^{11}} \right)} = 0,118 \text{ мм.}$$

4. M1 и M4.

$$b = 2,256 \times \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4}{4} \frac{0,32 \cdot 1,5}{(1,5 - 0,32)} \times \left( \frac{1 - 0,286^2}{2,04 \cdot 10^{11}} + \frac{1 - 0,33^2}{7,31 \cdot 10^{10}} \right)} = 0,161 \text{ мм.}$$

5. M1 и M5.

$$b = 2,256 \times \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4}{4} \frac{0,32 \cdot 1,5}{(1,5 - 0,32)} \times \left( \frac{1 - 0,286^2}{2,04 \cdot 10^{11}} + \frac{1 - 0,33^2}{7,31 \cdot 10^{10}} \right)} = 0,161 \text{ мм.}$$

6. M1 и M6.

$$b = 2,256 \times \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4}{4} \frac{0,32 \cdot 1,5}{(1,5 - 0,32)} \times \left( \frac{1 - 0,286^2}{2,04 \cdot 10^{11}} + \frac{1 - 0,45^2}{2,37 \cdot 10^{10}} \right)} = 0,244 \text{ мм.}$$

Таким образом, можно отметить, что ширина зоны действия контактных напряжений при вальцевании цилиндрических оболочек большого диаметра мала по сравнению с геометрическими размерами заготовки и валцов. Поэтому при теоретических расчетах процессов гибки листа силовое воздействие на заготовку со стороны упорного вала можно принять сосредоточенным при условии  $\rho > r_1$ .

Для определения опорных реакций, поперечных сил, изгибающих моментов, действующих на заготовку, а также вычисления значений ее прогибов и углов поворота сечений необходимо составить расчетную схему изгиба заготовки (рис. 6).

При расчете примем следующие допущения.

1. На рассматриваемом этапе вальцевания нижние валки не вращаются.
2. Как известно, напряженное и деформированное состояние заготовки при изгибе зависит

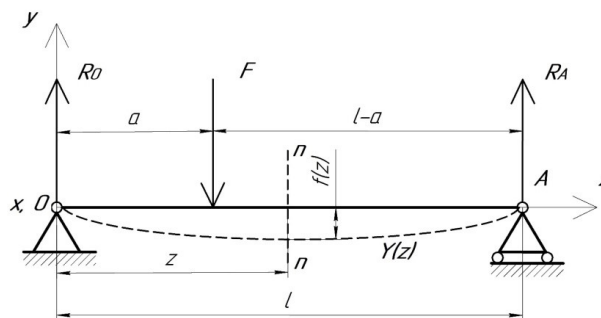


Рис. 6. Расчетная схема вальцевания заготовки на основе примера расчета изгиба двухопорной статически определимой балки

от формы и размеров ее поперечного сечения. Для исследуемого случая считаем заготовку широкой, т.е. ее ширина несоизмеримо больше ее толщины.

Для расчетной схемы, приведенной на рис. 6, определим уравнения реакции опор  $R$ , перерезывающей силы  $Q$  и изгибающего момента  $M$ , используя известные методы сопротивления материалов, [16].

$$R_0 = F \frac{(l-a)}{l}, R_A = F \frac{a}{l}. \quad (2)$$

Для условия  $0 \leq z \leq a$  получим следующие выражения.

$$Q(z) = F \frac{(l-a)}{l}. \quad (3)$$

$$M(z) = F \frac{(l-a)z}{l}. \quad (4)$$

Для условия  $a \leq z \leq l$  получим выражения вида:

$$Q(z) = -F \frac{a}{l}. \quad (5)$$

$$M(z) = F \frac{a}{l} (l-z). \quad (6)$$

Координата опасного сечения  $z_0$  и величина максимального изгибающего момента  $M_{\max}$  будут определяться:

$$z_0 = a \text{ и } M_{\max} = F \frac{a(l-a)}{l}.$$

Рассмотрим уравнения поперечного изгиба  $Y(z)$  и максимального прогиба  $f(z)$  нейтральной линии заготовки [16].

Для условия  $0 \leq z \leq a$  при  $0 \leq a \leq l/2$  получим следующие выражения.

$$Y(z) = -\frac{Fa^2(l-a)^2}{6E_2J_x l} \left[ 2\frac{z}{a} + \frac{z}{l-a} - \frac{z^3}{a^2(l-a)} \right]. \quad (7)$$

Для условия  $a \leq z \leq l$  получим выражения вида:

$$Y(z) = -\frac{Fa^2(l-a)^2}{6E_2J_x l} \times \left[ 2\frac{l-z}{l-a} + \frac{l-z}{a} - \frac{(l-z)^3}{a(l-a)^2} \right]. \quad (8)$$

Величина максимального прогиба заготовки  $f(z)$  будет определена следующими выражениями.

$$f(z) = -\frac{F(l-a)l^2\sqrt{3}}{27EJ_x} \sqrt{\left(1 - \frac{(l-a)^2}{l^2}\right)^3}$$

при

$$z = \sqrt{\frac{l^2 - (l-a)^2}{3}}. \quad (9)$$

Величины максимальных углов поворота сечений заготовки будут равны.

$$\theta = -\frac{F(l-a)a}{6EJ_x l} (a + 2(l-a)) \text{ при } z = 0 \quad (10)$$

$$\theta = -\frac{Fa}{6EJ_x l} (l^2 - a^2) \text{ при } z = l. \quad (11)$$

Уравнения поперечного изгиба нейтральной линии  $Y(z)$  в исследуемом случае представляют собой плоские кривые, заданные в явном виде для функции  $y=f(x)$  в декартовой системе координат (рис. 6). Для того, чтобы определить радиус кривизны заготовки при вальцевании, используем известные математические выражения [18].

$$\rho(z) = \frac{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{dY}{dz}\right)^2\right]^3}}{d^2Y/dz^2}. \quad (12)$$

Для условия  $0 \leq z \leq a$  вставим выражение (7) в (12).

$$\rho(z) = \frac{E_2J_x l}{F(l-a)z} \times \sqrt{\left[1 + \frac{F^2(l-a)^2}{36E_2^2J_x^2} (a(2l-a) - 3z^2)^2\right]^3}, \quad (13)$$

$$J_x = \frac{Lh^3}{12}. \quad (14)$$

Выражение (13) показывает радиус кривизны нейтральной линии заготовки при вальцевании (рис. 6). Для дальнейшего анализа целесообразно выразить величины  $a$  и  $z$  в выражении (13) через величину  $l$ , т.е. выразить в безразмерном виде.

Для условия  $0 \leq z \leq a$  при  $0 \leq a \leq l$  введем  $a = \chi l$ , где  $0 \leq \chi \leq 1$ . Тогда запишем  $0 \leq z \leq a$ ,  $0 \leq z \leq \chi l$ ,

$0 \leq \frac{z}{l} \leq 1$ . Введем обозначение  $\xi = \frac{z}{\chi l}$ , где  $0 \leq \xi \leq 1$ .

Тогда выражение (13) можно переписать в следующем виде:

$$\rho(z) = \frac{E_2J_x}{Fl} \frac{1}{(1-\chi)\chi\xi} \times \sqrt{\left[1 + \frac{F^2l^4}{36E_2^2J_x^2} (1-\chi)^2\chi^2(2-\chi(1+3\xi^2))^2\right]^3}. \quad (15)$$

Выражение (7) примет вид:

$$Y(z) = -\frac{Fl^3}{6E_2J_x} (1-\chi)\xi\chi^2(2-\chi-\xi^2\chi). \quad (16)$$

Для условия  $a \leq z \leq l$  вставим выражение (8) в (12).

$$\rho(z) = \frac{E_2J_x l}{Fa(l-z)} \times \sqrt{\left[1 + \frac{F^2a^2}{36E_2^2J_x^2} (a^2 - l^2 + 3(l-z)^2)^2\right]^3}. \quad (17)$$

Для условия  $a \leq z \leq l$  при  $0 \leq a \leq l$  введем  $a = \chi l$ , где  $0 \leq \chi \leq 1$ . Тогда запишем  $a \leq z \leq l$ ,  $\chi l \leq z \leq l$ ,

$1 \leq \frac{z}{l} \leq \frac{1}{\chi}$ . Введем обозначение  $\xi = \frac{z}{\chi l}$ , где  $1 \leq \xi \leq \frac{1}{\chi}$ .

Тогда выражение (16) можно переписать в следующем виде:

$$\rho(z) = \frac{E_2J_x}{Fl} \frac{1}{\chi(1-\xi\chi)} \times \sqrt{\left[1 + \frac{F^2l^4}{36E_2^2J_x^2} \chi^2(\chi^2 - 1 + 3(1-\xi\chi)^2)^2\right]^3}. \quad (18)$$

Выражение (8) примет вид:

$$Y(z) = \frac{Fl^3}{6E_2J_x} \chi^2 (1 - \xi\chi)(\chi - 2\xi + \xi^2\chi). \quad (19)$$

По аналогии выразим выражения (3–6) через величину  $l$ . Для условия  $0 \leq z \leq a$  получим следующие выражения:

$$Q(z) = F(1 - \chi). \quad (20)$$

$$M(z) = Fl(1 - \chi)\xi\chi. \quad (21)$$

Для условия  $a \leq z \leq l$  получим уравнения:

$$Q(z) = -F\chi. \quad (22)$$

$$M(z) = Fl\chi(1 - \xi\chi). \quad (23)$$

Как правило, большинство методик расчетов на прочность деталей машин основаны на оценке прочности материала в опасной точке или сечении на базе допускаемых напряжений. Такие напряжения определяются из условия недостижения опасных величин — предела текучести (для пластического материала) или временного сопротивления (для хрупкого материала). При обработке материалов давлением необходимо исходить не из закона Гука, а из появления местных напряжений в обрабатываемом материале, исходя из его предела текучести. Такая оценка прочности называется расчетом на прочность по предельному состоянию, т.е. когда материал конструкции теряет способность сопротивляться внешним воздействиям. В нашем случае в заготовке развиваются чрезмерные деформации от статических нагрузок, и под действием пластического течения материал заготовки приобретает желаемую форму.

В теории обработки металлов давлением, с целью упрощения расчетов, вводится допущение Прандтля, при котором в диаграмме напряжения — деформации ( $\sigma - \epsilon$ ) участок прямой, выражающий закон Гука, непосредственно переходит в горизонтальную прямую без плавного перехода [7, 8].

Таким образом, допускается равенство между пределами пропорциональности и текучести. Длина горизонтального участка диаграммы не ограничивается, т.е. материал считается идеально пластичным, не упрочняющимся. Такая диаграмма называется диаграммой Прандтля.

Замена реальных диаграмм напряжения — деформации схематизированной диаграммой Прандтля допустима для стали, сплавов на основе меди и алюминия, а также для материалов, имеющих диаграммы с ограниченной длиной площадки текучести.

При изгибе, как в рассматриваемом случае, расчет ведется по нормальным напряжениям, распределенным по высоте сечения неравномерно (рис. 7).

В обычном случае допустимые напряжения изгиба находятся в пределах действия закона Гука. Согласно формуле Навье, максимальные напряжения действуют на краях сечения (рис 7а).

$$\sigma_{\text{упр}} = \frac{M(z)}{W_x}. \quad (24)$$

$$W_x = \frac{Lh^2}{6}. \quad (25)$$

По мере возрастания нагрузки напряженное состояние поперечного сечения заготовки переходит из упругой зоны в зону пластического течения материала. Данная зона распространяется от краев сечения в направлении нейтральной оси (рис 7б). Предельное состояние наступит тогда, когда пластические деформации распространятся по всему поперечному сечению заготовки (рис 7в). После этого дальнейшая деформация сечения будет происходить без увеличения изгибающего момента. В данной зоне формируется так называемый пластический шарнир. Пластический момент сопротивления данного сечения определяется следующим выражением [16]:

$$W_{\text{пл}} = \frac{Lh^2}{4}. \quad (26)$$

При вальцевании, особенно для случая, когда радиус сгибаемой заготовки намного больше, чем радиус вальцов, в поперечном сечении заготовки формируются как пластическая, так и упругая зоны. Это связано с тем, что часть заготовки в поперечном сечении испытывает окружное растяжение, а другая ее часть — окружное сжатие. При снятии внешних нагрузок растянутые слои стремятся сократить свою длину, а сжатые — увеличить. Это вызывает изменение формы (радиуса кривизны) и размеров (разную толщину) заготовки. Данное явление называют пружинением.

В основе теоретических расчетов пружинения находится теорема А. А. Ильюшина о разгрузке. Согласно этой теореме, разгрузка происходит по закону Гука. Если тело при нагружении испытывало неоднородную деформацию, то при разгрузке в нем возникнут остаточные напряжения, которые определяются разностью между напряжениями, действующими в нагруженном теле, и фиктивными напряжениями, которые возникли бы в теле при упругом деформировании той же кривизны [8].

В специальной литературе и справочниках имеются и другие теории, а также диаграммы и графики для различных металлов и сплавов. Анализ

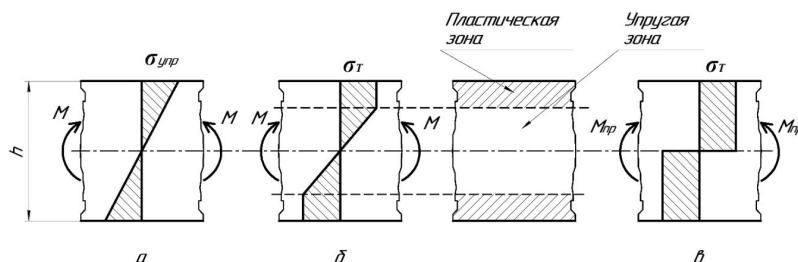


Рис. 7. Расчет нормальных напряжений при изгибе

информации показывает, что изменение радиуса гибки зависит от пластичности металла, толщины заготовки, угла изгиба и других факторов.

В данной работе для расчета пружинения предлагается использовать энергетический подход. В работе [17] получены абсолютные и относительные данные о преобразовании энергии в ходе деформации при вдавливании стального закаленного шара в различные материалы.

Как известно, работа, совершаемая силой над телом, равна произведению величины данной силы на пройденное телом расстояние. Для нашего случая сила давления упорного вала  $F$  прогибает плоский лист заготовки на некоторое максимальное расстояние  $f(z)$ , уравнение (9). Тогда энергия прогиба заготовки будет определяться выражением:

$$A_{\Sigma} = Ff(z) = -\frac{F^2(l-a)l^2\sqrt{3}}{27E_2J_x} \sqrt{\left(1 - \frac{(l-a)^2}{l^2}\right)^3}$$

при

$$z = \sqrt{\frac{l^2 - (l-a)^2}{3}}. \quad (27)$$

Как и ранее, выразим величины  $a$  и  $z$  в выражении (27) через величину  $l$ :

$$A_{\Sigma} = Ff(z) = -\frac{F^2l^3\sqrt{3}}{E_2J_x27} (1-\chi)\sqrt{\chi^3(2-\chi)^3}$$

при

$$\xi = \sqrt{\frac{2}{3\chi} - \frac{1}{3}}, \quad 0 \leq \xi \leq \frac{1}{\chi}. \quad (28)$$

Введем допущение, что энергия формоизменения расходуется только на упругие и пластические деформации заготовки, т.е. иные потери энергии малы.

$$\frac{A_{\text{упр}}}{A_{\Sigma}} + \frac{A_{\text{пласт}}}{A_{\Sigma}} = 1. \quad (29)$$

Для удобства введем следующие обозначения:

$$\frac{A_{\text{упр}}}{A_{\Sigma}} = n_{\text{упр}} \text{ и } \frac{A_{\text{пласт}}}{A_{\Sigma}} = n_{\text{пласт}}.$$

Из-за эффекта пружинения необходимо добавить дополнительную энергию  $\Delta A_{\Sigma}$ , которая должна компенсировать эффект пружинения и достичь заданного значения радиуса кривизны  $\rho$  заготовки после окончания вальцевания.

$$\frac{A_{\text{упр}} + \Delta A_{\text{упр}}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} + \frac{A_{\text{пласт}} + \Delta A_{\text{пласт}}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = 1. \quad (30)$$

Главным условием является то, что дополнительная энергия пластических деформаций должна быть равна энергии упругих деформаций, вызывающих эффект пружинения —  $\Delta A_{\text{пласт}} = A_{\text{упр}} = A_{\Sigma} n_{\text{упр}}$ .

$$\frac{A_{\text{упр}} + \Delta A_{\text{упр}}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} + \frac{A_{\text{пласт}} + A_{\Sigma} n_{\text{упр}}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = 1. \quad (31)$$

Введем допущение, что при малом увеличении энергии деформации  $A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}$  соотношение между энергиями упругих и пластических деформаций не меняется. Тогда запишем следующее выражение:

$$\frac{A_{\text{пласт}} + A_{\Sigma} n_{\text{упр}}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = n_{\text{пласт}}, \quad \frac{A_{\text{пласт}}}{A_{\Sigma}} = n_{\text{пласт}}. \quad (32)$$

$$\frac{A_{\Sigma} n_{\text{пласт}} + A_{\Sigma} n_{\text{упр}}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = n_{\text{пласт}}. \quad (33)$$

Преобразуем выражение (33):

$$\Delta A_{\Sigma} = A_{\Sigma} \frac{(1 - n_{\text{пласт}})}{n_{\text{пласт}}}. \quad (34)$$

$$A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma} = A_{\Sigma} \left[ 1 + \frac{(1 - n_{\text{пласт}})}{n_{\text{пласт}}} \right]. \quad (35)$$

Как следует из уравнения (28), компенсировать эффект пружинения на практике можно только за счет увеличения силы  $F$ .

Перепишем выражение (28).

$$A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma} = -\frac{F_{1+\Delta}^2 l^3 \sqrt{3}}{E_2 J_x 27} (1-\chi) \sqrt{\chi^3 (2-\chi)^3}. \quad (36)$$

Вставим в выражение (36) уравнения (28) и (36).

$$-\frac{F_{1+\Delta}^2 l^3 \sqrt{3}}{E_2 J_x 27} (1-\chi) \sqrt{\chi^3 (2-\chi)^3} = -\frac{F^2 l^3 \sqrt{3}}{E_2 J_x 27} (1-\chi) \sqrt{\chi^3 (2-\chi)^3} \left[ 1 + \frac{(1 - n_{\text{пласт}})}{n_{\text{пласт}}} \right]. \quad (37)$$

$$F_{1+\Delta}^2 = F^2 \left[ 1 + \frac{(1 - n_{\text{пласт}})}{n_{\text{пласт}}} \right]. \quad (38)$$

$$F_{1+\Delta} = F \frac{1}{\sqrt{n_{\text{пласт}}}}. \quad (39)$$

Таким образом, выражение (39) показывает величину силы давления упорного вала  $F_{1+\Delta'}$ , которая позволяет получить заданный радиус кривизны  $\rho$  заготовки с учетом ее пружинения.

**Результаты теоретических исследований.** Как известно, при настройке параметров вальцовочного станка можно решать прямую и обратную технологические задачи. В первом случае по известному значению параметров настройки станка определяется кривизна деформированной заготовки. Во втором — вычисление параметров настройки процесса вальцевания по заданной кривизне заготовки. В данном случае целесообразно выбрать комбинацию этих двух способов. Сначала необходимо выбрать типовые параметры настройки валков, и далее, используя численные методы, подобрать величину силы давления упорного вала  $F_{1+\Delta'}$ , которая позволяет получить заданный радиус кривизны  $\rho$  заготовки с учетом ее пружинения.

Примем, что верхний (упорный валок) станка размещен на одинаковом расстоянии от центров нижних (подающих) валков. Это означает, что относительные параметры имеют следующие значения:

$$a = \chi l = 0,5l; \quad \chi = 0,5.$$

$$\xi = \sqrt{\frac{2}{3\chi} - \frac{1}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3 \cdot 0,5} - \frac{1}{3}} = 1.$$

Подставим полученные значения в выражения (15) и (18).

$$\rho(z) = \frac{E_2 J_x}{Fl} \frac{1}{(1-0,5)0,5 \cdot 1} \times \sqrt{\left[ 1 + \frac{F^2 l^4}{36 E_2^2 J_x^2} (1-0,5)^2 0,5^2 (2-0,5(1+3 \cdot 1^2))^2 \right]^3}$$

Относительное распределение энергии упругих и пластических деформаций при контактном взаимодействии различных материалов

№ опыта	F, кН	A <sub>упр</sub> , Дж	A <sub>пласт</sub> , Дж	n <sub>упр</sub> = A <sub>упр</sub> /A <sub>Σ</sub>	n <sub>пласт</sub> = A <sub>пласт</sub> /A <sub>Σ</sub>
Материал валка — М1, материал заготовки — М1					
1, 2	52,71	3,509	2,553	0,579	0,421
3	72,55	4,37	5,893	0,426	0,574
4	100,13	8,194	13,168	0,384	0,616
5	105,42	7,257	14,986	0,326	0,674
A	106,76	7,189	15,768	0,313	0,687
$n_{\text{пласт}} = 236,992F^{0,001} - 240,202$					
Материал валка — М1, материал заготовки — М2					
6	18,37	0,509	0,867	0,370	0,630
7	28,29	0,993	2,373	0,295	0,706
8	42,70	1,81	5,139	0,260	0,740
9	57,34	2,365	9,412	0,201	0,799
10	63,52	2,669	15,144	0,15	0,85
11	71,17	2,682	20,434	0,116	0,883
B	35,57	1,744	4,533	0,278	0,722
C	71,17	3,851	29,204	0,117	0,884
D	88,96	2,27	24,339	0,085	0,915
$n_{\text{пласт}} = 5,605 \cdot 10^{-4} F^{0,594} - 0,443$					
Материал валка — М1, материал заготовки — М3					
12	6,81	0,176	0,164	0,482	0,518
13	8,27	0,123	0,239	0,340	0,660
14	17,31	0,481	1,952	0,198	0,802
$n_{\text{пласт}} = 1,641 \cdot 10^3 F^{1,664 \cdot 10^{-4}} - 1,643 \cdot 10^3$					
Материал валка — М1, материал заготовки — М4					
15	10,14	0,225	0,86	0,207	0,793
16	16,19	0,444	2,418	0,155	0,845
17	23,18	0,735	4,825	0,132	0,868
18	30,87	0,892	10,139	0,081	0,919
19	40,39	1,404	20,155	0,049	0,951
20	39,23	1,121	20,774	0,051	0,949
E	16,01	0,457	2,305	0,165	0,835
F	31,14	0,852	9,882	0,079	0,921
G	44,01	0,996	27,06	0,036	0,964
H	44,48	0,771	28,547	0,026	0,974
$n_{\text{пласт}} = 0,003F^{0,437} + 0,601$					
Материал валка — М1, материал заготовки — М5					
21	2,58	0,838	0,162	0,072	0,928
22	6,06	0,045	0,934	0,046	0,954
23	9,39	0,074	3,029	0,025	0,975
24	13,23	0,053	7,737	0,007	0,993
I	9,79	0,099	4,652	0,021	0,979
$n_{\text{пласт}} = 8,558 \cdot 10^{-4} F^{0,517} + 0,878$					
Материал валка — М1, материал заготовки — М6					
25	0,97	0,004	0,219	0,017	0,983
26	1,13	0,0036	0,471	0,008	0,992
J	0,89	0,0095	0,351	0,026	0,974
$n_{\text{пласт}} = 15,381F^{0,005} - 14,897$					

$$\rho(z) = 4 \frac{E_2 J_x}{Fl}$$

$$\rho(z) = \frac{E_2 J_x}{Fl} \frac{1}{0,5(1 - 1 \cdot 0,5)} \times \sqrt{\left[ 1 + \frac{F^2 l^4}{36 E_2^2 J_x^2} 0,5^2 (0,5^2 - 1 + 3(1 - 1 \cdot 0,5)^2)^2 \right]^3}$$

$$\rho(z) = 4 \frac{E_2 J_x}{Fl} \quad (40)$$

Изменим выражение (40).

$$F = 4 \frac{E_2 J_x}{\rho(z) l} \quad (41)$$

Перепишем выражение (39) с учетом (40).

$$F_{1+\Delta} = 4 \frac{E_2 J_x}{\rho(z) l} \sqrt{\left[ 1 + \frac{(1 - n_{\text{пласт}})}{n_{\text{пласт}}} \right]} \quad (42)$$

$$F_{1+\Delta} = 4 \frac{E_2 J_x}{\rho(z) l} \frac{1}{\sqrt{n_{\text{пласт}}}} \quad (43)$$

Для решения уравнения (43) необходимо воспользоваться результатами работы [17].

**Результаты практических исследований.** В работе [17] получены интерполяционные характеристики распределения энергии в ходе внедрения стального закаленного шара в различные материалы. Список данных материалов приведен в табл. 2. Применяя методику обработки экспериментальных графиков [17], показывающих соотношение между силой внедрения шара в исследуемые материалы и глубиной внедрения шара в данные материалы получены данные по соотношению энергий упругих и пластических деформаций в зоне контакта шара и материала (табл. 4).

Рассмотрим применение выражения (43) на примере вальцевания заготовки из дюралюмина. В табл. 2 и табл. 4 данный случай определяется сочетанием материалов М1 и М4.

Определим значение первоначальной силы вальцевания из выражения (41).

$$F_{M4} = 4 \frac{E_{M4} J_x}{\rho(z) l} = 4 \frac{E_{M4} L h^3}{12 \rho(z) l} = \frac{7,308 \cdot 10^{10} \cdot 4 \cdot (0,02)^3}{3 \cdot 1,5 \cdot 0,5} = 1039 \text{ кН.} \quad (44)$$

По табл. 4 определим величину удельной энергии пластической деформации.

$$n_{\text{пласт}} = 0,003 F^{0,437} + 0,601 = 0,003 \cdot (1039)^{0,437} + 0,601 = 0,663. \quad (45)$$

С учетом выражения (43) получим:

$$F_{1+\Delta} = 4 \frac{E_{M4} L h^3}{12 \rho(z) l} \frac{1}{\sqrt{n_{\text{пласт}}}} = 1039 \frac{1}{\sqrt{0,663}} = 1276 \text{ кН.} \quad (46)$$

Таким образом, в зависимости от толщины листа заготовки можно численно определить величину силы вальцевания с учетом эффекта пружинения.

**Обсуждение результатов.** При изготовлении цилиндрических заготовок большого диаметра (более 1,5 м) методом вальцевания в первую очередь необходимо рассчитать технологические параметры станка. На практике при имеющихся габаритах вальцовочных барабанов проще всего изменить усилие прижатия верхнего (упорного) вала к листовой заготовке для получения заданной кривизны заготовки. В работе получены аналитические зависимости, позволяющие вычислить данные усилия прижатия для различных толщин листовой заготовки с учетом эффекта пружинения. Учет пружинения осуществлялся на основе соотношения энергий упругих и пластических деформаций, возникающих в материале заготовки в процессе вальцевания.

**Выводы и заключение.** Предлагаемая авторами методика расчета технологических параметров вальцевания листовой заготовки различной толщины позволяет получить заданные конструктивные параметры радиуса кривизны цилиндрической обечайки с целью дальнейшего использования сварки в процессе изготовления изделия.

#### Библиографический список

- Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. Москва: Машиностроение, 1994. 384 с.
- Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. 17-е изд., испр. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 542 с.
- Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. В 2 т. Москва: Наука, 1965.
  1. Элементарная теория и задачи. 1965. 364 с.
  2. Более сложные вопросы теории и задачи. 1965. 480 с.
- Беляев Н. М. Сопротивление материалов. Москва: Наука, 1976. 608 с.
- Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. Москва: Наука, 1967. 984 с.
- Григолюк Э. И., Селезнева И. Т. Механика твердых деформируемых тел. В 7 т. Т. 5. Неклассические теории колебаний стержней, пластин и оболочек. Москва: Наука, 1973. 272 с.
- Лысов М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. Москва: Машиностроение, 1966. 236 с.
- Лысов М. И., Сосов Н. В. Формообразование деталей гибкой. Москва: Машиностроение, 2001. 388 с.
- Metal forming handbook // Schuler. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hong Kong; London; Milan; Paris; Santa Clara; Singapore; Tokyo: Springer, 1998. 573 p.
- Multiscale Modelling in Sheet Metal Forming, ESAFORM Bookseries on Material Forming / Ed. D. Banabic. Springer International Publishing Switzerland, 2016. 416 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44070-58.
- Кривонос Е. В. Исследование деформации обечайки с вафельным подкреплением при вальцевании и разработка метода компенсации отклонений формы // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 4. С. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-90-98.
- Кривонос Е. В. Обоснование схемы фрезерования вафельного фона // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 83–90. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-83-90.
- Hosford W. F., Caddell R. M. Metall Forming. Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press, 2007. 328 p. ISBN 978-0-511-35453-3.
- Rott O., Hцmberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models. Preprint. No. 1151. Berlin: WIAS, 2006. 23 p.
- Ibaraki S., Shimizu T. A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes // Precision Engineering. 2010. Vol. 34, Issue 4. P. 675–682. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001.

16. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.

17. Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование динамических характеристик удара двух твердых деформируемых тел при скорости удара до 100 м/с // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-5-14.

18. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Санкт-Петербург: Лань, 2010. 608 с.

**ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Машиноведение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.  
SPIN-код: 8610-2957

AuthorID (РИНЦ):473365  
ORCID: 0000-0002-7585-433X  
Author ID (SCOPUS): 6506002416  
ResearcherID: N-2038-2015

Адрес для переписки: dichernyavskiy@omgtu.tech  
**ЧЕРНЯВСКИЙ Даниил Дмитриевич**, студент гр. ФИТ-201 факультета информационных технологий и компьютерных систем ОмГТУ, г. Омск.

#### Для цитирования

Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование упруго-пластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее вальцевании // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 44–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54.

Статья поступила в редакцию 10.02.2023 г.

© Д. И. Чернявский, Д. Д. Чернявский

UDC 629.78  
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54

**D. I. CHERNYAVSKY**  
**D. D. CHERNYAVSKY**

**Omsk State  
Technical University,  
Omsk, Russia**

## STUDY ELASTOPLASTIC BENDING OF A SHEET BLANK OF DIFFERENT THICKNESS WHILE ROLLING

The work analyzes the process of rolling the sheet blank to obtain a cylindrical shell of large diameter. The analysis is carried out on the basis of strength calculations of elastoplastic bending of the sheet billet taking into account the springing effect. Springing calculation is carried out on the basis of available ratios of energy of plastic and elastic deformations formed in the material of the sheet blank. Conclusions are drawn and practical recommendations are given, which can be used in the process of adjustment of process parameters of rolling machines.

**Keywords:** cylindrical shells, elastic and plastic deformations, radius of curvature, energy of formation of elastic and plastic deformations, technological parameters of rolling.

#### References

1. Lizin V. T., Pyatkin V. A. *Proyektirovaniye tonkostennykh konstruktsey* [Designing thin-walled constructions]. Moscow, 1994. 384 p. (In Russ.).
2. Feodos'yev V. I. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. 17th ed. Moscow, 2018. 542 p. (In Russ.).
3. Timoshenko S. P. *Soprotivleniye materialov. V 2 t.* [Strength of materials. In 2 vols.]. Moscow, 1965. (In Russ.).  
Vol. 1. *Elementarnaya teoriya i zadachi* [Elementary theory and tasks]. 1965. 364 p.  
Vol. 2. *Boleye slozhnyye voprosy teorii i zadachi* [More complex issues of theory and task]. 1965. 480 p.
4. Belyayev N. M. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow, 1976. 608 p. (In Russ.).

5. Vol'mir A. S. *Ustoychivost' deformiruyemykh sistem* [The stability of deformable systems]. Moscow, 1967. 984 p. (In Russ.).
6. Grigolyuk E. I., Selezneva I. T. *Mekhanika tverdykh deformiruyemykh tel. V 7 t.* Т. 5. *Neklassicheskiye teorii kolebaniy stержney, platin i obolochek* [Mechanics of Solid Deformable Bodies. In 7 vols. Vol. 5. Non-classical theories of vibrations of rods, plates and shells]. Moscow, 1973. 272 p. (In Russ.).
7. Lysov M. I. *Teoriya i raschet protsessov izgotovleniya detaley metodami gibki* [Theory and processes of manufacturing parts bending methods]. Moscow, 1966. 236 p. (In Russ.).
8. Lysov M. I., Sosov N. V. *Formoobrazovaniye detaley gibkoy* [Forming parts of bending methods]. Moscow, 2001. 388 p. (In Russ.).
9. *Metal forming handbook* // Schuler. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hong Kong; London; Milan;

Paris; Santa Clara; Singapore; Tokyo: Springer, 1998. 573 p. (In Engl.).

10. Multiscale Modelling in Sheet Metal Forming, ESAFORM Bookseries on Material Forming / Ed. D. Banabic. Springer International Publishing Switzerland, 2016. 416 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44070-58. (In Engl.).

11. Krivonos E. V. Issledovaniye deformatsii obechayki s vafel'nyim podkrepleniym pri val'tsevanii i razrabotka metoda kompensatsii otkloneniy formy [Investigation of deformation of shell with waffle reinforcement during rolling and development of method for compensation of deviations forms] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 4. P. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-90-98. (In Russ.).

12. Krivonos E. V. Obosnovaniye skhemy frezerovaniya vafel'nogo fona [Justification scheme for milling waffle background] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 83–90. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-83-90. (In Russ.).

13. Hosford W. F., Caddel R. M. Metall Forming. Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press, 2007. 328 p. ISBN 978-0-511-35453-3. (In Engl.).

14. Rott O., Hömberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models. Preprint. No. 1151. Berlin: WIAS, 2006. 23 p. (In Engl.).

15. Ibaraki S., Shimizu T. A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes // Precision Engineering. 2010. Vol. 34, Issue 4. P. 675–682. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001. (In Engl.).

16. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveyev V. V. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Handbook of Strength of Materials]. 2nd ed. Kyiv, 1988. 736 p. (In Russ.).

17. Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Issledovaniye dinamicheskikh kharakteristik udara dvukh tverdykh deformiruyemykh tel pri skorosti udara do 100 m/s [Study of dynamic characteristics of impact of two solid deformable bodies at impact speed of up to 100 m/s] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 5 (179). P. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-5-14. (In Russ.).

18. Bronshteyn I. N., Semendyayev K. A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov [Handbook of mathematics for engineers and university students]. St. Petersburg, 2010. 608 p. (In Russ.).

**CHERNYAVSKY Dmitriy Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Machine Engineering Technology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 8610-2957

AuthorID (RSCI):473365

ORCID: 0000-0002-7585-433X

Author ID (SCOPUS): 6506002416

ResearcherID: N-2038-2015

Correspondence address: dichernyavskiy@omgtu.tech

**CHERNYAVSKY Daniil Dmitriyevich**, Student gr. FIT-201 of Information Technologies and Computer Systems Faculty, OmSTU, Omsk.

#### For citations

Chernyavsky D. I., Chernyavsky D. D. Study elastoplastic bending of a sheet blank of different thickness while rolling // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 44–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54.

Received February 10, 2023.

© D. I. Chernyavsky, D. D. Chernyavsky

## АППРОКСИМАЦИЯ ДВУМЕРНЫХ МНОЖЕСТВ ТОЧЕЧНЫМИ КОНФИГУРАЦИЯМИ

В статье рассматриваются плоские точечные множества, обладающие иерархической структурой, и решение задачи аппроксимации плоской точечной конфигурации некоторой «идеальной» конфигурацией. Заданное множество представляет собой размытый, деформированный, искаженный образ или множество случайных реализаций неизвестного «идеального» образа. Заданное множество и его аппроксиманта должны обладать схожими иерархическими структурами. Структура аппроксимирующей конфигурации определяется априори. Аппроксимация осуществляется методом наименьших квадратов при условии указания соответствия элементов структур. Аппроксимирующими преобразованиями являются линейные преобразования. В статье описываются преобразования подобия, как наиболее общие.

**Ключевые слова:** точечное множество, конфигурация, аппроксимация, линейные преобразования, расстояние.

**Введение.** Одной из задач инженерной геометрии является задача идентификации геометрической формы объекта по конечной совокупности измерений отдельных её элементов или наблюдаемых отдельных её реализаций. Наблюдаемая форма может быть искажена или деформируема, и тогда возникает задача восстановления её первоначального или наиболее вероятного вида. Такая задача является стандартной задачей аппроксимации, если форма аналитически описывается явной зависимостью одного параметра от других [1].

Задача аппроксимации резко усложняется, если явная зависимость отсутствует. В этом случае требуется априорная информация, позволяющая заранее задать некоторые параметры, например, порядок формы [2]. В некоторых задачах предварительно задаются геометрические свойства, такие как обладание осевой или центральной симметрией и другие [3].

Исследуемый объект может обладать иерархической структурой. В этом случае восстановлению подлежит не только искаженная форма объекта, но и расположение и форма отдельных его элементов. Такая задача возникает в системах автоматического распознавания изображений [4]. Известна задача приближения множества точек плоскости кривой 2-го порядка, в частности, окружностью [5–7]. При этом никакие условия на взаимное положение точек на кривой не накладываются. При наличии таких условий требуется изменить подход к решению. Учитывая, что точки образуют некоторую точечную конфигурацию, возникает задача приближения данного точечного множества точечной конфигурацией с заданными метрическими соотношениями параметров [8, 9].

**Постановка задачи.** Пусть на плоскости задано множество  $A = \{A_1, \dots, A_n\}$  точек, которое можно рассматривать как искаженный (деформируемый, размытый) образ некоторого «идеального» множе-

ства-оригинала  $C = \{C_1, \dots, C_m\}, C_j(z'')$ . Положение каждой точки  $A_i$  в выбранной системе координат определяется радиус-вектором  $z_i + z^0$ , где  $z^0$  — случайный вектор с нулевым математическим ожиданием и ненулевой дисперсией. Вектор  $z^0$  не зависит от  $z_i$ .

Пусть данному  $A$  каким-либо способом может быть поставлено в соответствие конечное множество «идеальных» преобразований-оригиналов  $B = \{B_1, \dots, B_k\}, B_j = \{B(z'_j)\}$ . Каждый из них наделен некоторой структурой иерархического типа, которую можно назвать точечной конфигурацией. Множество оригиналов формально может быть создано методом генерации большого числа достаточно разнообразных геометрических фигур различной сложности. Положение каждой точки оригинала задается в выбранной системе координат, а сам оригинал занимает частное положение.

Пусть имеется множество  $T = \{T: \{z'\} \rightarrow \{z''\}\}$  преобразований плоскости, каждое из которых трансформирует множество конфигураций  $B$  в множество четких образов  $C$ . Множество  $T$  может быть множеством подобий, аффинитетов, проективитетов, бирациональных преобразований высшего порядка.

Таким образом, можно сформулировать следующие задачи:

— для заданного точечного множества  $A$ , выбранного оригинала  $B_j$  и выбранного преобразования  $T$  найти образ  $C_j = T(B_j)$ , наименее отклоняющийся от  $A$  по норме

$$F_j = \|C_j - A\| \rightarrow \min;$$

— среди множества конфигураций  $B$  найти такую конфигурацию  $B_j$ , чтобы в заданном классе преобразований

$$\|T(B_j) - A\| = \min.$$

**Основной алгоритм.** Прежде всего, заметим, что структура множества  $\mathbf{A}$  может характеризоваться следующими внешними признаками:

— наличием детерминированной составляющей, искаженной случайной деформацией, но тем не менее позволяющей сделать априорные заключения об относительном положении точек и структуре множества  $\mathbf{A}$ ;

— каждая точка или часть точек множества  $\mathbf{A}$  задается некоторой выборкой, придающей структуре множества  $\mathbf{A}$  стохастический характер, но позволяющей сделать априорные выводы о структуре всего множества.

Исходя из этого иерархическую структуру множества  $\mathbf{A}$  и структуру  $\mathbf{V}_j$  можно определять в следующей последовательности.

Во-первых, определение общей структуры множества  $\mathbf{A}$  и сопоставление каждой возможной частной структуре  $\mathbf{A}_i^C$  множества  $\mathbf{G}_i^A$  возможных параметризаций:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \{A_1, \dots, A_n\} \rightarrow \\ \rightarrow \mathbf{A}_i^C &= \{\{A_{1, \dots, j}\}_1, \{A_{\dots, 1, \dots, 2}\}_2, \dots, \{A_{\dots, 1, \dots, n}\}_s\}, \\ \mathbf{A}_i^C &= \bigcup_1^s \mathbf{A}_{s,i}^C, \mathbf{A}_i^C \rightarrow \mathbf{G}_i^A = \{G_1^A, \dots, G_q^A\}_i, \end{aligned}$$

здесь  $\mathbf{G}_{ji}^A, j = 1, \dots, q$  — параметризация структуры  $\mathbf{A}_i^C$ , представляющая собой множество априорных утверждений или метрических соотношений дискриптивного характера, описывающих  $\mathbf{A}_i^C$  приближенно или расплывчато. Подмножества  $\{A_{1, \dots, j}\}_1, \dots, \{A_{\dots, 1, \dots, n}\}_s$  определяют искаженные геометрические фигуры, форма которых определяется априори. Объединение этих фигур составляет множество  $\mathbf{A}$ .

Во-вторых, задание множества конфигураций оригиналов  $\mathbf{V}$ , соответствующих частной структуре  $\mathbf{A}_i^C$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \{B_1, \dots, B_k\}; B_i = \bigcup_1^m B_{m,i}, \\ \mathbf{V}_{i,i} &\leftrightarrow \{A_{1, \dots, j}\}_1, \dots, \mathbf{V}_{s,i} \leftrightarrow \{A_{\dots, 1, \dots, n}\}_s, \\ \mathbf{V}_i &\rightarrow \mathbf{G}_i^B = \{G_1^B, \dots, G_p^B\}_i, \mathbf{G}_i^B \leftrightarrow \mathbf{G}_i^A. \end{aligned}$$

Здесь  $\mathbf{V}_i$  — некоторое множество точек, взаимное положение которых четко указано.  $\mathbf{G}_i^B$  — четкая параметризация  $\mathbf{V}_i$ , заданного в частном положении относительно системы координат.

В-третьих, выбор преобразования  $T$ , который зависит от  $\mathbf{A}_i^C$ . Как правило, для многих практических задач можно ограничиться группой линейных преобразований  $z'' = az' + b$ .

В-четвертых, вычисление коэффициентов преобразования  $T$  при условии, чтобы суммарная величина отклонений заданных точек  $z_i$  множества  $\mathbf{A}$  от вычисленных точек  $z_i''$  множества  $\mathbf{C}$  была минимальной:

$$F_j = \sum_{A_i^C} |z_i'' - z_i|^2 + \dots + \sum_{A_{s,i}^C} |z_i'' - z_i|^2 \rightarrow \min.$$

Решение основывается на методе наименьших квадратов:

$$\frac{\partial F_j}{\partial a} = 0, \frac{\partial F_j}{\partial b} = 0$$

и сводится к решению систем линейных уравнений.

**Выбор структуры образов.** Ввиду большого разнообразия частных структур  $\mathbf{A}_i^C$  и конфигураций  $\mathbf{V}$  рассмотрим некоторые частные случаи. Первым случаем пусть будет  $1 \leq m \leq n$ . Множество  $\mathbf{A}$  может быть охарактеризовано как обладающее одноэлементной структурой. Это возможно, когда точки  $A_i$  есть результат случайного разброса вокруг средней или математического ожидания. При этом  $d\mathbf{A} \leq k|z^0|$ . Результатом вычисления будет математическое ожидание множества  $\mathbf{A}$  и

$$F = \sum_{i=1}^n |z_i'' - z_i|^2 \rightarrow \min,$$

$$\mathbf{V} = \{B_1(0)\}, \mathbf{G}^B = \emptyset, z'' = z + b.$$

Множеству  $\mathbf{A}$  может быть приписана двухэлементная структура:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^2 &= \mathbf{A}^{2,1} \cup \mathbf{A}^{2,2}, \\ d\mathbf{A}^{2,1} &\leq k|z^0|, d\mathbf{A}^{2,2} \leq k|z^0|; \\ \mathbf{A}_1^{2,1} &= \{\{A_1\}, \{A_2, \dots, A_n\}\}, \\ \mathbf{A}_2^{2,1} &= \{\{A_1, A_2\}, \{A_3, \dots, A_n\}\}, \dots \end{aligned}$$

Конфигурация  $\mathbf{V}$  есть единичный отрезок действительной оси,  $\mathbf{G}^A$  — отрезок определенной длины:

$$\mathbf{V} = \{B_1(0), B_2(1)\}, \mathbf{G}^B = \emptyset, z'' = az + b.$$

Трехэлементная структура множества  $\mathbf{A}$  может быть двух видов: в виде отрезка с внутренней точкой и в виде треугольника:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^3 &= \mathbf{A}^{3,1} \cup \mathbf{A}^{3,2} \cup \mathbf{A}^{3,3}, d\mathbf{A}^{3,i} \leq k|z^0|; \\ \mathbf{A}_1^{3,1} &= \{\{A_1\}, \{A_2\}, \{A_3, \dots, A_n\}\}, \\ \mathbf{A}_2^{3,1} &= \{\{A_1\}, \{A_2, A_3\}, \{A_4, \dots, A_n\}\}, \dots \end{aligned}$$

В случае отрезка  $\mathbf{G}^A$  определяет положение элемента  $\mathbf{A}^{3,2}$  относительно элементов  $\mathbf{A}^{3,1}$  и  $\mathbf{A}^{3,3}$ . В случае треугольника  $\mathbf{G}^A$  определяет его форму: прямоугольную, равнобедренную, равностороннюю или общего вида и его метрические характеристики — соотношения длин сторон и др. Конфигурация

$$\mathbf{V} = \{\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2\},$$

$$\mathbf{V}_1 = \{B_{1,1}(x'_1), B_{1,2}(x'_2), B_{1,3}(x'_3)\}, x'_1 < x'_2 < x'_3,$$

$$\mathbf{V}_2 = \{B_{1,1}(x'_1), B_{1,2}(z'_2), B_{1,3}(x'_3)\}, \text{Im } z'_2 \neq 0.$$

И так далее.

Вторым частным случаем будет  $m = n$ . Множества  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{V}$  должны быть упорядочены, т. е.  $B_i \leftrightarrow A_i$ . Тогда

$$F = \sum_{i=1}^n |z_i'' - z_i|^2 \rightarrow \min,$$

$$\mathbf{V} = \{B_i\}, z'' = az + b.$$

Третьим частным случаем будет  $m > n$ . Тогда

$$F_j = \sum_{B_{i,s}} \sum_{A_{i,s}} |z_i'' - z_i|^2 \rightarrow \min.$$

Решение задачи однозначно и легко обобщается на любое число заданных точек, если каждая частная структура исходного множества носит очевидный кластерный характер, т. е.

$$A_{i,j}^C \cap A_{i,j+1}^C = \emptyset, d(A_{i,j}^C, A_{i,j+1}^C) > \max d(A_i, A_{i+1} \dots)$$

Предположим, что это не так. Пусть

$$A_{i,j}^C \cap A_{i,j+1}^C = A_{i,j}^{C+} = A_{i,j+1}^{C-}$$

То есть

$$A_{i,j}^C \setminus A_{i,j}^{C+} \rightarrow B_{i,j}, A_{i,j+1}^{C+} \setminus A_{i,j+1}^{C-} \rightarrow B_{i,j+1}$$

Но точки множества  $A_{i,j}^{C+} = A_{i,j+1}^{C-}$ , как и сами эти множества, нельзя однозначно поставить в соответствие ни множеству  $B_{i,j}$  ни  $B_{i,j+1}$ . Тогда существуют разные возможности, зависящие от общей структуры исходного множества. Например,  $A_{i,j}^{C+} = A_{i,j+1}^{C-}$  можно выделить в отдельный структурный элемент, а конфигурацию  $B_i$  дополнить соответствующим элементом, находящимся в определенной метрической связи с соседними элементами.

Другой возможностью может стать разбиение множества  $A_{i,j}^{C+} = A_{i,j+1}^{C-}$  на два подмножества с отнесением их соответствующим элементам конфигурации.

**Тестовые задачи.** Рассмотрим простые примеры. Пусть

$$A(z) = \{A_1(1+i), A_1(2+i), A_1(2+2i), A_1(2+3i), A_1(4+3i)\}$$

Припишем этому множеству несколько структур

$$A^1 = \left\{ \begin{aligned} \{A_1, A_2\} = A^1, \{A_3\} = A^1 \\ \{A_2, A_4, A_5\} = A^1 \end{aligned} \right\}$$

$$A^2 = \left\{ \begin{aligned} \{A_1\} = A^2, \{A_2, A_3, A_4\} = A^2, \{A_5\} = A^2 \end{aligned} \right\}$$

$$A^3 = \{A_i\} = A^3, i = 1, \dots, 5$$

Пусть  $G^{A,1} = G^{A,2} = "A^1$  равноудаленно от  $A^1$  и  $A^3"$ .  $G^{A,3} = "A^3 A^3" = |A_2^3 A_3^3| = |A_3^3 A_4^3| = |A_4^3 A_5^3|^u$ . Выберем конфигурацию  $B^1(z') = B^2(z') = \{B_1(0), B_2(1), B_3(2)\}$ ,  $B^3(z') = \{B_j(j-1), j = 1, \dots, 5\}$ . Для всех структур  $z'' = az' + b$ . Тогда

$$F_1 = \sum_{i=1}^2 |az'_i + b - z_i|^2 + \sum_{i=3}^3 \dots + \sum_{i=4}^5 \dots \rightarrow \min,$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^1 |az'_i + b - z_i|^2 + \sum_{i=2}^4 \dots + \sum_{i=5}^5 \dots \rightarrow \min,$$

$$F_3 = \sum_{i=1}^5 |az'_i + b - z_i|^2 \rightarrow \min,$$

После  $\frac{\partial F_i}{\partial a} = 0, \frac{\partial F_i}{\partial b} = 0$  получаем системы линейных уравнений, решение которых дает значения  $a, b$ . Результат приведен на рис. 1.

Второй пример. Задана выборка  $A_i(x_i, y_i), i = 1, \dots, 100$ . Предварительный анализ дает основания предположить пятиэлементную кластерную структуру множества  $A$  (рис. 2):

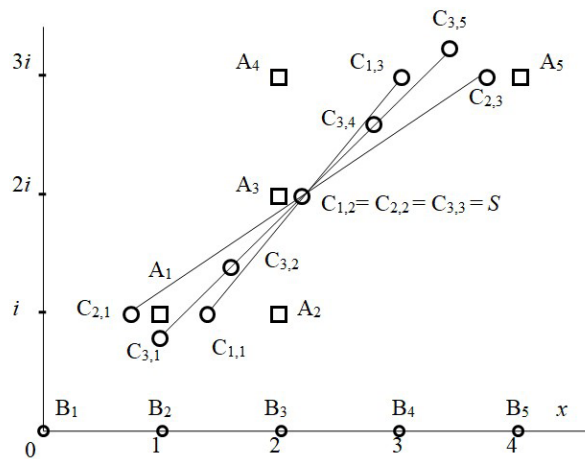


Рис. 1. Аппроксимация множества пяти точек

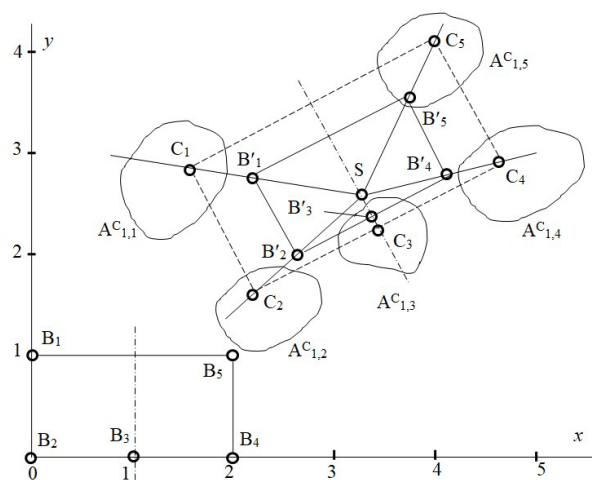


Рис. 2. Аппроксимация кластерной структуры прямоугольником

$$A_1 = \cup A_{1,j}^C, j = 1, \dots, 5,$$

$$A_{1,1}^C = \{A_1, \dots, A_{20}\}, A_{1,2}^C = \{A_{21}, \dots, A_{40}\},$$

$$A_{1,3}^C = \{A_{41}, \dots, A_{60}\},$$

$$A_{1,4}^C = \{A_{61}, \dots, A_{80}\}, A_{1,5}^C = \{A_{81}, \dots, A_{100}\}.$$

Каждый элемент общей структуры — одноэлементный по структуре кластер объемом 20 точек. Нумерация точек внутри кластера не имеет значения. Параметризация  $G^A$  следующая:  $G^A = "A_1$  описывается приближенно прямоугольником с соотношением длин сторон 1:2. Одна из длинных сторон разделена на две равные части". Конфигурация-оригинал:  $B = \{B_1(0, 1), B_2(0, 0), B_3(1, 0), B_4(2, 0), B_5(2, 1)\}$ ,  $B_j(x'_j, y'_j) \rightarrow A_{1,j}^C$ .

Преобразование  $T: B \rightarrow C_1$  выбрано подобием  $z'' = az' + b$ . Тогда

$$F_1 = \sum_{j=1}^5 \left( \sum_{i=20j-19}^{20j} |az'_i + b - z_i|^2 \right) \rightarrow \min.$$

После вычислений по МНК получаем преобразование (значения коэффициентов округлены):

$x'' = 1,23x' - 0,65y' + 2,2$ ,  $y'' = 0,65x' + 1,23y' + 1,6$ . Множество точек образа:  $S = \{C_1(1,55; 2,83), C_2(2,2; 1,6), C_3(3,43; 2,25), C_4(4,66; 2,9), C_5(4,01; 4,13)\}$ . Из уравнений преобразования легко вычисляется угол поворота  $\alpha \approx 27^\circ 50'$  и коэффициент гомотетии  $k \approx 1,4$ .

**Заключение.** Задача аппроксимации искаженных точечных конфигураций рассмотрена на плоскости. Возможны её обобщения как в сторону увеличения размерности пространства, так и в сторону увеличения порядка носителя формы. Первый случай — обобщение на трехмерное пространство и многомерные пространства в литературе не описан. Обобщений в сторону увеличения порядка носителя формы крайне мало. В качестве носителя использовалась двумерная сфера.

#### Библиографический список

1. Юрков В. Ю. Однопараметрическая аппроксимация плоских семейств прямых // Проблемы машиноведения: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 363–368.
2. Podolak J., Shilane P., Giesen J., Gross M. [et al.]. Example-based 3D scan completion // Proc. Symposium on Geometry Processing. 2005. P. 23–32.
3. Каркищенко А. Н., Гречухин И. А. Локализация характерных точек на основе естественной симметрии изображений // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Москва: НИИАС, 2012. С. 261–265.
4. Simari P., Kalogerakis E., Singh K. Folding meshes: Hierarchical mesh segmentation based on planar symmetry // Eurographics Symposium on Geometry Processing Proceedings. 2006. P. 111–119. DOI:10.1145/1281957.1281972.
5. Михляев С. В. Исследование итерационного метода наименьших квадратов для оценивания параметров аппрокси-

мирующей окружности // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13, № 5. С. 41–50.

6. Прихач И. В., Мамчиц М. В., Гундина М. А. Приближение окружностью данных, полученных при обработке промышленных изображений // X Машеровские чтения. Витебск: ВГУ имени П. М. Машерова, 2016. С. 25–27. ISBN 978-985-517-548-4.

7. Ефимов Ю. С., Матвеев И. А. Выделение точных границ радужки на изображении глаза // Информационные технологии. 2017. Т. 23, № 4. С. 300–309.

8. Коноваленко И. А., Кохан В. В., Николаев Д. П. Оптимальная аффинная аппроксимация проективного преобразования изображений // Сенсорные системы. 2019. Т. 33, № 1. С. 7–14. DOI: 10.1134/S02350092190100629.

9. Козловский А. Н. Алгоритм обнаружения вершины угла на изображении на основе аппроксимации контура бинарного изображения // Международный научный журнал. 2016. № 9. С. 63–73.

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

SPIN-код: 2414-1438

ORCID: 0000-0003-2667-8103

Адрес для переписки: viktor\_yurkov@mail.ru

#### Для цитирования

Юрков В. Ю. Аппроксимация двумерных множеств точечными конфигурациями // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 55–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-55-59.

Статья поступила в редакцию 04.04.2023 г.

© В. Ю. Юрков

## APPROXIMATION OF PLANAR POINT SETS BY POINT CONFIGURATIONS

The paper is devoted to planar linear point sets having hierarchical structure. Point configurations arise naturally in several areas of computational geometry. In the paper, the linear approximation of planar point configurations is discussed. Planar point configuration is considered as a fuzzed and deformed image of some ideal configuration. Also, it may be considered as random realizations of ideal one. Pure images and deformed ones are described by the same hierarchical structures. The structure of approximating configuration is determined a priori. Image approximation is realized by mean of least square restoration. The correspondence of the structures is one of the parameters of approximation. Identification procedure is realized by linear transformations. Similarity transformations as general ones are used in the calculations.

**Keywords:** point set, configuration, approximation, linear transformation, distance.

### References

1. Yurkov V. Yu. Odnoparametricheskaya approksimatsiya ploskikh semeystv pryamykh [One-parameter approximation of planar families of straight lines] // Problemy mashinovedeniya. *Problems of Mechanical Engineering*. Omsk, 2019. P. 363–368. (In Russ.).
2. Podolak J., Shilane P., Giesen J., Gross M. [et al.]. Example-based 3D scan completion // Proc. Symposium on Geometry Proceeding. 2005. P. 23–32. (In Engl.).
3. Karkishchenko A. N., Grechukhin I. A. Lokalizatsiya kharakternykh toчек na osnove estestvennoy simmetrii [Localisation of characteristic points based on natural image symmetry] // Intellektual'nyye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. *Intelligent Control Systems for Railway Transport*. Moscow, 2012. P. 261–265. (In Russ.).
4. Simari P., Kalogerakis E., Singh K. Folding meshes: Hierarchical mesh segmentation based on planar symmetry // Eurographics Symposium on Geometry Processing Proceedings. 2006. P. 111–119. DOI: 10.1145/1281957.1281972. (In Engl.).
5. Mikhlyayev S. V. Issledovaniye neiteratsionnogo metoda naimen'shikh kvadratov dlya otsenivaniya parametrov approksimiruyushchey okruzhnosti [A study of a non iterative least squares method for estimating the parameters of an approximating circle] // Vychislitel'nyye tekhnologii. *Computational Technologies*. 2008. Vol. 13, no. 5. P. 41–50. (In Russ.).
6. Prikhach I. V., Mamchits M. V., Gundina M. A. Priblizheniye okruzhnost'yu dannykh, poluchennykh pri obrabotke promyshlennykh izobrazheniy [Circle Approximation of industrial image processing data] // X Masherovskiye chteniya. *X Masherov Readings*. Vitebsk, 2016. P. 25–27. ISBN 978-985-517-548-4. (In Russ.).
7. Efimov Yu. S., Matveyev I. A. Vydeleniye tochnykh granits raduzhki na izobrazhenii glaza [Iris image segmentation by paired gradient method with pupil boundary refinement] // Informatsionnyye tekhnologii. *Information Technologies*. 2017. Vol. 23, no. 4. P. 300–309. (In Russ.).
8. Konovalenko I. A., Kokhan V. V., Nikolayev D. P. Optimal'naya affinnaya approksimatsiya proyektivnogo preobrazovaniya izobrazheniy [Optimal affine approximation of image projective transformation] // Sensornyye sistemy. *Sensory Systems*. 2019. Vol. 33, no. 1. P. 7–14. DOI: 10.1134/S02350092190100629. (In Russ.).
9. Kozlovskiy A. N. Algoritm obnaruzheniya vershiny ugla na izobrazhenii na osnove approksimatsii kontura binarnogo izobrazheniya [Vertex detection algorithm in image processing based on binary image contour approximation] // Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal. *International Scientific Journal*. 2016. No. 9. P. 63–73. (In Russ.).

**YURKOV Viktor Yuryevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Design and Technology of Light Industry Product Manufacture Department, Omsk State Technical University, Omsk.  
SPIN-code: 2414-1438  
ORCID: 0000-0003-2667-8103  
Correspondence address: viktor\_yurkov@mail.ru

### For citations

Yurkov V. Yu. Approximation of planar point sets by point configurations // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 55–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-55-59.

Received April 04, 2023.

© V. Yu. Yurkov

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ БЕСПОРЯДОЧНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Статья посвящена разработке алгоритма определения координат и ориентации объектов с помощью технического зрения с использованием языка программирования Python и библиотеки компьютерного зрения OpenCV. В статье представлена программа, позволяющая установить координаты объекта, произвольно расположенного в области видимости камеры, а также определить его ориентацию. Эти данные позволят выполнить эффективный захват объекта схватом манипулятора. В современном машиностроении задачи такого рода являются достаточно актуальными, они позволяют повысить автономность гибких производственных систем и сделать производство более безопасным.

**Ключевые слова:** гибкая производственная система, промышленный робот, техническое зрение, распознавание объектов, координаты объекта, ориентация схвата.

**Введение.** Гибкие производственные системы (ГПС) являются высшей ступенью автоматизации. Они обеспечивают высокую производительность, точность обработки и возможность быстрой переналадки на выпуск новой продукции. Ключевыми факторами развития ГПС являются использование станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и достижения современной промышленной робототехники. Промышленный робот, обслуживающий станок с ЧПУ, позволяет полностью исключить человека из технологического процесса, устранить любые возможные простои, связанные с человеческим фактором, и обеспечить безопасность [1, 2].

Целью данной работы является попытка разработать программу, позволяющую промышленному роботу находить объекты манипулирования и определять их координаты с помощью технического зрения. Результаты могут быть применены в реальных промышленных условиях на роботизированных участках, работа на которых связана с обнаружением объектов в рабочей зоне промышленного робота.

Промышленные роботы, оснащенные системами технического зрения, способны решать самые разнообразные задачи [3–7], в том числе с использованием искусственного интеллекта [8]. Однако, несмотря на кажущуюся простоту, загрузка станка деталями является достаточно сложной задачей

даже для современного промышленного робота. Одна из наиболее сложных проблем — правильная ориентация заготовки при установке в приспособление, а также ориентация готовой детали при извлечении ее.

Захваты современных промышленных роботов специализированы под детали определенных типов. Чаще всего применяются клещевые захваты (рис. 1).

Ширина раскрытия захвата лимитирована и должна соответствовать определенным размерам объекта манипулирования. Рабочие поверхности схватов, как правило, адаптированы под детали определенной формы. Например, для деталей цилиндрической формы могут использоваться призматические или полукруглые рабочие поверхности. Для надежного захвата объекта манипулирования схват должен находиться в определенном положении, то есть быть ориентированным относительно объекта манипулирования.

К примеру, для надежного захвата детали типа вал рабочие плоскости схвата должны быть параллельны образующим вала, иначе захват либо не произойдет вообще, либо положение вала в схвате будет неопределенным, так как во время срабатывания схвата вал повернется на некоторый угол. Поэтому требуется развернуть схват таким образом, чтобы плоскость движения рабочих элементов была перпендикулярна оси вала, а сам захват

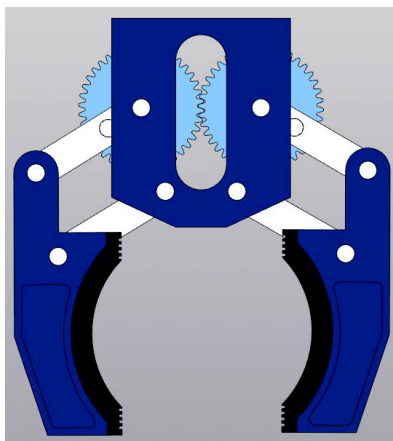


Рис 1. Конструкция типичного клещевого захватного устройства промышленного робота

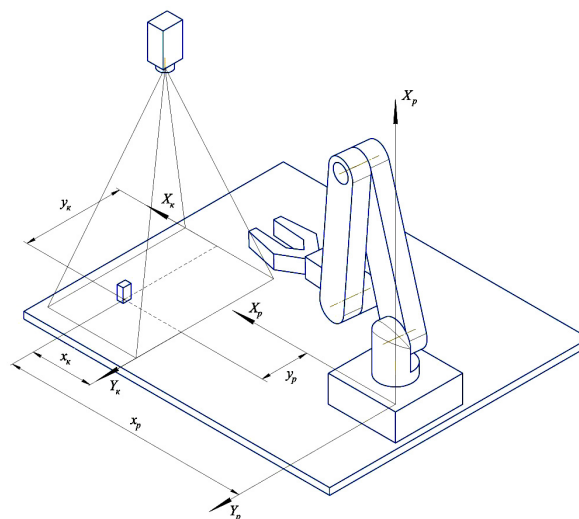


Рис. 2. Системы координат камеры и робота

должен происходить в строго определенном месте детали, характеризуемом определенным диаметром.

**Реализация технического зрения в гибких производственных системах для определения координат беспорядочно расположенных объектов.** Проблема точного ориентирования детали может быть решена одним из трех способов.

Во-первых, определенное положение детали может быть придано вручную, то есть перед началом цикла обработки рабочий вручную выкладывает детали в определенном положении на определенной позиции в пределах рабочей области промышленного робота. Для этого могут использоваться специальные палеты или иные приспособления, исключающие случайное смещение детали. Данный способ является самым простым, но наименее приемлемым. Наличие ручных операций, связанных с перекладыванием детали, снижает степень автоматизации и производительность, добавляет человеческий фактор.

Другим способом является применение специальных вибрационных бункеров, обеспечивающих быструю и надежную ориентацию деталей. Детали и заготовки могут быть загружены в бункер навалом, правильная ориентация происходит автоматически. Данный способ является надежным и высокотехнологичным, однако он применим только к деталям и заготовкам небольшого размера. Кроме того, вибрационные бункеры занимают существенное пространство в рабочей зоне, а взаимное соударение деталей при вибрации может привести к снижению качества поверхностей.

Наиболее прогрессивным на сегодняшний день способом точной ориентации деталей и заготовок, обрабатываемых на станках с ЧПУ, является использование компьютерного зрения.

Использование компьютерного зрения делает работу промышленного робота и станка с ЧПУ полностью автономной. Оно полностью согласуется с парадигмами «Индустрии 4.0».

Самым распространенным на сегодняшний день средством поддержки компьютерного зрения является OpenCV — библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом. Данная библиотека содержит в себе несколько тысяч алгоритмов, позволяющих установить не только ориентацию детали и определение ее координат, но и распознавание, контроль и обеспечение безопасности [9].

Использование данной библиотеки приближает возможности промышленного робота к возможностям искусственного интеллекта. При этом в наилучшей степени возможности библиотеки раскрываются в сочетании с применением языка программирования Python.

Для успешного использования промышленного робота в составе ГПС необходима стыковка систем координат промышленного робота и станка ЧПУ. При использовании компьютерного зрения добавляется система координат камеры [10]. Минимальные погрешности при перемещении достигаются при условии параллельности осей координат всех трех систем.

Начало системы координат промышленного робота связано с его основанием. Начало системы координат камеры связано с одним из углов кадра (рис. 2).

В техническом зрении объекты наиболее часто идентифицируют с помощью цвета и формы, причем автоматизировать обнаружение по цвету проще. При этом используют цветовые маски, накладываемые на изображение. Одной из проблем является фильтрация изображения, так как оно содержит множество объектов такого же или близкого оттенка, что и объект манипулирования. В предложенной программе выполнена фильтрация контуров по размерам. Определив контуры границ объекта, легко могут быть вычислены координаты его центра.

Таким образом, алгоритм работы программы должен включать следующие шаги:

- 1) получение изображения;
- 2) наложение цветовой маски;
- 3) определение контуров;
- 4) фильтрация «лишних» контуров;
- 5) определение координат объектов в системе координат камеры и их ориентации в пространстве

(это необходимо, чтобы установить захват робота в требуемое положение;

6) пересчет координат в систему координат робота;

7) передача полученных координат в систему управления робота и выполнение операций.

Ниже представлен код программы, позволяющий обнаруживать, вычислять координаты и необходимые углы разворота захвата для манипулирования объектами. Код программы имеет необходимые

пояснения, кроме того, для удобства программа разбита на отдельные блоки и дано пояснение к каждому блоку.

Сначала нужно выполнить импорт библиотек. Работа с компьютерным зрением требует библиотек: OpenCV (собственно библиотека компьютерного зрения), NumPY (линейная алгебра). Также понадобится библиотека Treading (обработка потоков данных, например, видеопотоков) и DobotDllType (управление роботом).

```
# Импорт необходимых библиотек
import threading
import DobotDllType as dType
import cv2
import numpy as np
```

Ниже представлен код подключения робота к ПК и программирование операции «Выход в 0».

```
# Подключение робота
CON_STR = {dType.DobotConnect.
DobotConnect_NoError:
"DobotConnect_NoError",
dType.DobotConnect.DobotConnect_NotFound:
"DobotConnect_NotFound",
dType.DobotConnect.DobotConnect_Occupied:
"DobotConnect_Occupied"}

api = dType.load()

state = dType.ConnectDobot(api, "", 115200)[0]
print("Connect status:", CON_STR[state])

# Вывод робота в "0"
dType.SetHOMECommandEx(api, 0, 1)
```

Все движения робота будут программироваться одной функцией, содержащей в себе команды, связанные с перемещением манипулятора робота к объекту манипулирования, его захватом и перемещением в нужную точку. После выполнения каждого физического действия с помощью метода dType.dSleep(500) обеспечивается пауза длительностью 0,5 с.

```
# Функция, программирующая манипуляции
# объекта роботом
def robot_move(x, y, angle, y_end):
# Выбор схвата в качестве рабочего инстру-
# мента
dType.SetEndEffectorParamsEx(api, 59.7, 0, 0, 1)
# Безопасная высота 30 мм
dType.SetPTPJumpParamsEx(api, 30, 100, 1)
# Открыть захват
dType.SetEndEffectorGripperEx(api, 1, 0)
dType.dSleep(500)
# Переместиться к объекту
dType.SetPTPCmdEx(api, 0, x, y, -21.8, angle, 1)
dType.dSleep(500)
# Захватить объект
dType.SetEndEffectorGripperEx(api, 1, 1)
dType.dSleep(500)
# Переместить объект
dType.SetPTPCmdEx(api, 0, 145.6, y_end, -24.2,
0, 1)
dType.dSleep(500)
# Отпустить объект
dType.SetEndEffectorGripperEx(api, 1, 0)
dType.dSleep(500)
```

Представленный ниже код обеспечивает нахождение объекта манипулирования на столе, определение его координат и угла поворота. Поиск объекта выполняется по цвету (в данном случае объект синего цвета), для этого на полученное с камеры изображение «накладывается» цветовая маска, заданная в цветовом пространстве HSV. Маска выделяет нужный объект. Далее найденный объект обводится в прямоугольный контур.

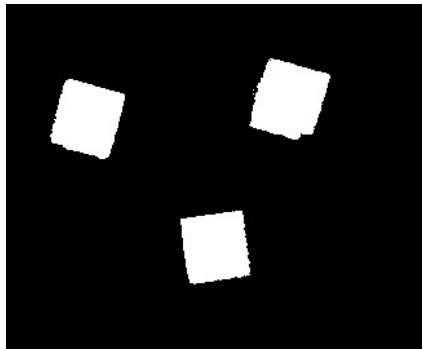
Поскольку в кадре могут быть другие объекты синего цвета, необходимо выполнить фильтрацию найденных контуров. Отсевание контуров выполняется по размеру, то есть отсеиваются контуры размером меньше заданного.

Переменная cl\_pr обеспечивает прерывание видеопотока после нахождения объектов. Прерывание необходимо, так как, перемещаясь, схват манипулятора попадает в поле зрения камеры и нарушает видимость.

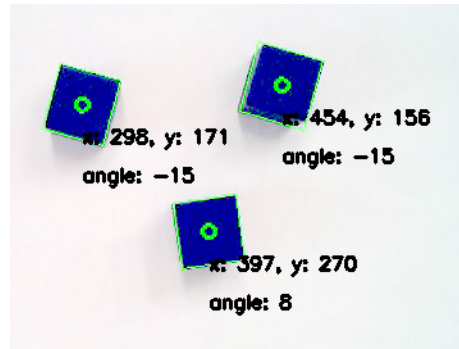
Также в данном блоке определяются координаты центра объекта манипулирования.

```
# Создание пустого списка для хранения коор-
# динат объекта
Obj = []
# Связывание видеопотока с камеры с пере-
# менной capImg
capImg = cv2.VideoCapture(1)

while (capImg.isOpened()):
# Считывание кадров в переменную frame
ret, frame = capImg.read()
# Переменная для прерывания показа текущего
# кадра
cl_pr = False
# Запуск цикла со «стоп-кадром»
while True:
# Перевод изображения в цветовое простран-
# ство HSV
frame_hsv = cv2.cvtColor(frame,
cv2.COLOR_BGR2HSV)
# Установка границ цветового диапазона
low_blue = np.array([100, 80, 30], dtype = "uint8")
high_blue = np.array([140, 255, 255], dtype =
"uint8")
# Накладывание цветовой маски
blue_mask = cv2.inRange(frame_hsv, low_blue,
high_blue)
# Вывод на экран изображения с наложенной
# маской
cv2.imshow("Objects", blue_mask)
# Поиск контуров и запись их в переменную
# contours
contours, hierarchy = cv2.findContours(blue_
mask,
cv2.RETR_LIST,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
# Перебор найденных контуров
for icontour in contours:
# Поиск прямоугольных контуров
rect = cv2.minAreaRect(icontour)
# Вычисление площади контура для выпол-
# нения
# фильтрации
area = int(rect[1][0]*rect[1][1])
# Фильтрация контуров
if area > 1500:
# Поиск вершин прямоугольника
box = cv2.boxPoints(rect)
# Округление координат вершин
```



а)



б)

Рис. 3. Представление, полученное в программе:  
а) изображение, полученное при наложении цветовой маски;  
б) отображение координат и угла ориентации детали

```

box = np.int0(box)
# Отрисовка прямоугольного контура
cv2.drawContours(frame, [box], -1, (0, 255, 0), 1)
# Определение координат центров контуров
в СК
# камеры
x_cam = rect[0][1]
y_cam = rect[0][0]

```

Следует учесть, что координаты определены в системе координат камеры, начало которой находится в левом верхнем углу кадра. Сами координаты будут получены в пикселях.

Кроме определения координат, необходимо также определить угол поворота объекта. Перед выполнением захвата схват манипулятора разворачивается под тем же углом.

```

# Определение угла поворота схвата
if rect[2] <= 45:
    angle = int(-rect[2])
else:
    angle = int(90-rect[2])
# Отрисовка точки в центре конуэра
cv2.circle(frame, (int(rect[0][0]), int(rect[0][1])),
5, (0, 255, 0), 2)
# Указание координат и угла на экране
cv2.putText(frame, "x: %d, y: %d" % (rect[0][0],
rect[0][1]),
(int(rect[0][0]), int(rect[0][1]) + 30),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
0.5, (0, 255, 0), 2)
cv2.putText(frame, "angle: %d" % (angle),
(int(rect[0][0]), int(rect[0][1]) + 60),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
0.5, (0, 255, 0), 2)

# Запись координат и угла в список
Obj_tuple = (x_cam, y_cam, angle)
Obj.append(Obj_tuple)

# Вывод найденных контуров
cv2.imshow("Camera", frame)

# Ожидание закрытия видеопотока нажатием
клавиши # «q»
key_press = cv2.waitKey(0)
if key_press == ord('n'):
    break
elif key_press == ord('q'):
    cl_pr = True

```

```

break
if cl_pr:
    break

```

Далее необходимо перевести найденные координаты в систему координат робота (рис 2). Для этого необходимо учесть разницу в положении начал координат и тот факт, что полученные программой координаты выражены в пикселях. Таким образом, нужно пересчитать координаты из СК камеры в СК робота и перевести координаты в миллиметры.

```

# Определение координат объектов
# Перебор элементов списка Obj
for i in range(len(Obj)):
    x_rob = int(Obj[i][0]*0.472 + 182.2)
    y_rob = int(Obj[i][1]*0.472 - 165.2)
    angle = int(Obj[i][2])
    y_end = -150 + 25*i

```

Далее в программе выполняется перемещение объекта с помощью функции `robot_moove`, отвод робота на безопасное расстояние и выключение робота. На экран выводятся координаты объекта манипулирования и угол поворота схвата (рис. 3).

```

# Отработка движений роботом
robot_moove(x_rob + 0.2*i, y_rob, angle, y_end)

# Поднять захват на 30 мм
dType.SetPTPCmdEx(api, 7, 0, 0, 30, 0, 1)
dType.dSleep(500)
# Выключить захват
dType.SetEndEffectorGripperEx(api, 0, 0)

capImg.release()
cv2.destroyAllWindows()

print("x =", x_cam, "y =", y_cam, "angle =",
angle)
# Вывод списка с координатами
print(Obj)
Из приведенных рисунков (рис. 3а и б) видно, что определение координат объекта с помощью технического зрения является достаточно надежным методом, вероятность возникновения ошибки здесь низкая. Кроме того, несомненно, данный способ позволит не только облегчить труд рабочего, но и упростит подготовку управляющей программы для робота. Отпадет необходимость в «ручном» вычислении координат объектов.

```

**Заключение.** Полная автоматизация технологического процесса является одной из главных целей Индустрии 4.0. На сегодняшний день автоматизация процессов обработки достигла очень высокого уровня за счет повсеместного использования систем числового программного управления. Основной ресурс дальнейшего повышения уровня автоматизации — вспомогательные процессы, связанные с перемещением деталей и заготовок, нанесением меток, заменой изношенного инструмента и пр.

Преимуществами предложенного алгоритма является:

1. Эффективное применение фильтрации контуров.
2. Надежное определение координат.
3. Простота реализации.

Использование компьютерного зрения позволяет обеспечить высокие показатели производительности и качества, убрать человеческий фактор, оградить человека от опасных и вредных производственных факторов, повысить культуру производства.

#### Библиографический список

1. Бахрамов Н. М., Храмов В. В. Проблемы использования технического зрения роботов-ассистентов в контексте цифровой трансформации // Интеллектуальные ресурсы — региональному развитию. 2022. № 2. С. 163–167.
2. Андросов А. Ю., Горшков А. А., Луцков Ю. И. Размещение системы технического зрения на манипуляторе мобильного робота // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. № 11-1. С. 418–426.
3. Гуров В. С., Колодько Г. Н., Костяшкин А. Н. [и др.]. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения: моногр. / под ред. Л. Н. Костяшкина, М. Б. Никифорова. Москва: Физматлит, 2016. 240 с.
4. Котляр Д. И., Ломанов А. Н., Корнейчук В. С. Применение технического зрения для сканирования кромки лопатки в процессе ремонта // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 42–54. DOI: 10.23859/1994-0637-2022-1-106-4.
5. Юдин Д. А., Магергут В. З. Программный комплекс системы технического зрения для оценки состояния процесса обжига // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 257–262.
6. Бублик Д. А., Кононенко Р. В. К вопросу контроля геометрических параметров объектов двойной кривизны больших размеров при помощи системы технического зрения // Вестник Иркутского государственного технического универ-

ситета. 2019. № 4. С. 670–677. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-670-677.

7. Блохин К. О., Матлахов В. П., Хандожко В. А. Научно-емкая технология контроля качества керамической плитки с использованием технического зрения // Научно-емкие технологии в машиностроении. 2018. № 2. С. 27–34.

8. Прукс В. Э. Пример системы технического зрения на основе нейросетевого классификатора // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2012. № 10. С. 99–103.

9. Пелевин Е. Е., Балясный С. В. Оптимальные алгоритмы выделения контуров изображения в системе технического зрения // Juvenis scientia. 2016. № 6. С. 6–8. DOI: 10.15643/jscientia.2016.6.195.

10. Сокол Е. Е. Концепция системы технического зрения для контроля качества и сортировки готовых деталей // Молодежный вестник ИрГТУ. 2021. № 3. С. 20–25.

**АВЕРКОВ Константин Васильевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск. SPIN-код: 8407-0488

AuthorID (РИНЦ): 674150

AuthorID (SCOPUS): 55257667700

Адрес для переписки: averok@yandex.ru

**МАКАШИН Дмитрий Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного института Омского государственного технического университета, г. Омск; доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 1763-1883

AuthorID (РИНЦ): 926848

AuthorID (SCOPUS): 57203642272

Адрес для переписки: dima.makashin@gmail.com

#### Для цитирования

Аверков К. В., Макашин Д. С. Использование технического зрения в гибких производственных системах для определения координат беспорядочно расположенных объектов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 60–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-60-66.

Статья поступила в редакцию 23.01.2023 г.

© К. В. Аверков, Д. С. Макашин

## THE USE OF TECHNICAL VISION IN FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEMS TO DETERMINE COORDINATES OF RANDOMLY LOCATED OBJECTS

The article is devoted to the development of an object recognition algorithm using technical vision using Python and the OpenCV computer vision library. The article presents a program that allows you to set the coordinates of an object arbitrarily located in the field of view of the camera, as well as determine its orientation. This data will allow you to perform an effective capture of the object by the grip of the manipulator. In modern mechanical engineering, tasks of this kind are quite relevant, they make it possible to increase the autonomy of flexible production systems and make production safer.

**Keywords:** flexible production system, industrial robot, technical vision, object recognition, object coordinates, orientation of the grip.

### References

1. Bakhramov N. M., Khramov V. V. Problemy ispol'zovaniya tekhnicheskogo zreniya robotov-assistentov v kontekste tsifrovoy transformatsii [Directions for improving and integrating the robot vision system for integrated data mining] // *Intellectual'nyye resursy — regional'nomu razvitiyu. Intellectual Resources for Regional Development*. 2022. No. 2. P. 163–167. (In Russ.).
2. Androsov A. Yu., Gorshkov A. A., Lutskov Yu. I. Razmeshcheniye sistemy tekhnicheskogo zreniya na manipulyatore mobil'nogo robota [A placement of the vision system on the mobile robot manipulator] // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. Izvestiya TulGU. Technical Sciences*. 2014. No. 11-1. P. 418–426. (In Russ.).
3. Gurov V. S., Kolod'ko G. N., Kostyashkin L. N. [et al.]. Obrabotka izobrazheniy v aviatsionnykh sistemakh tekhnicheskogo zreniya [Image processing in aviation vision systems] / ed. by L. N. Kostyashkina, M. B. Nikiforova. Moscow, 2016. 240 p. (In Russ.).
4. Kotlyar D. I., Lomanov A. N., Korneychuk V. S. Primeneniye tekhnicheskogo zreniya dlya skanirovaniya kromki lopatki v protsesse remonta [The application of computer vision for scanning the blade edge during repair procedures] // *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta. Cherepovets State University Bulletin*. 2022. No. 1 (106). P. 42–54. DOI: 10.23859/1994-0637-2022-1-106-4 (In Russ.).
5. Yudin D. A., Magergut V. Z. Programmnyy kompleks sistemy tekhnicheskogo zreniya dlya otsenki sostoyaniya protsesssa obzhiga [Computer vision system software for assessment of firing process] // *Programmnyye produkty i sistemy. Software Products and Systems*. 2013. No. 2. P. 257–262. (In Russ.).
6. Bublik D. A., Kononenko R. V. K voprosu kontrolya geometricheskikh parametrov ob'yektov dvoynoy krivizny bol'shikh razmerov pri pomoshchi sistemy tekhnicheskogo zreniya [To control of geometrical parameters of large size double curvature objects using computer vision system] // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019. No. 4. P. 670–677. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-670-677. (In Russ.).
7. Blokhin K. O., Matlakhov V. P., Khandozhko V. A. Naukoyemkaya tekhnologiya kontrolya kachestva keramicheskoy plitki s ispol'zovaniyem tekhnicheskogo zreniya [Science intensive technology for ceramic tile quality control using computer vision] // *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. Science-based Technology in Mechanical Engineering*. 2018. No. 2. P. 27–34. (In Russ.).
8. Pruks V. E. Primer sistemy tekhnicheskogo zreniya na osnove neyrosetevogo klassifikatora [Example of a vision system based on a neural network] // *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Bulletin of I. Kant Baltic Federal University*. 2012. No. 10. P. 99–103. (In Russ.).
9. Pelevin E. E., Balyasnyy S. V. Optimal'nyye algoritmy vydeleniya konturov izobrazheniya v sisteme tekhnicheskogo zreniya [Optimal algorithm of edge detection within the system of computer vision] // *Juvenis scientia. Juvenis Scientia*. 2016. No. 6. P. 6–8. DOI: 10.15643/jscientia.2016.6.195. (In Russ.).
10. Sokol E. E. Kontseptsiya sistemy tekhnicheskogo zreniya dlya kontrolya kachestva i sortirovki gotovykh detaley [Vision system concept for quality control and sorting of finished parts] // *Molodezhnyy vestnik IrGTU. Young Researchers Journal of ISTU*. 2021. No. 3. P. 20–25. (In Russ.).

**AVERKOV Konstantin Vasilyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Technologies of Transport Engineering and Rolling Stock Repair Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.



SPIN-code: 8407-0488

AuthorID (RSCI): 674150

AuthorID (SCOPUS):55257667700

Correspondence address: averok@yandex.ru

**MAKASHIN Dmitriy Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal-cutting Machines and Tools Department, Mechanical Engineering Institute, Omsk State Technical University, Omsk; Associate Professor of Technologies of Transport Engineering and Rolling Stock Repair Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 1763-1883

AuthorID (RSCI): 926848

AuthorID (SCOPUS): 57203642272

Correspondence address: dima.makashin@gmail.com

**For citations**

Averkov K. V., Makashin D. S. The use of technical vision in flexible production systems to determine coordinates of randomly located objects // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 60–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-60-66.

**Received January 23, 2023.**

© **K. V. Averkov, D. S. Makashin**

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГРАФИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ

В данной статье рассматривается возможность развития графической подготовки студентов технических специальностей в области информационного моделирования (BIM-технологии). В настоящее время во всем мире BIM-технологии являются неотъемлемой частью строительной индустрии, идет процесс внедрения в Российской Федерации для поддержания конкурентоспособности застройщиков как на внутреннем рынке, так и при строительстве за границей. Параллельно с внедрением в сфере строительства встречаются попытки адаптации информационного моделирования в других сферах промышленности. На фоне этого возрос спрос на специалистов в сфере информационного моделирования; сотрудникам приходится переучиваться не только работать с новым программным обеспечением, но и уходить от индивидуального творчества отдельных сотрудников или отделов к коллективной работе над одним проектом одновременно всеми сотрудниками со своих рабочих мест (возможно, даже из разных городов и стран). Параллельно с этим идет создание различных программных продуктов в сфере информационного моделирования как в России, так и за рубежом. Большинство из них изначально направлены на строительство, но также встречаются адаптационные варианты для других сфер деятельности.

В связи с этим возник вопрос актуальной графической подготовки современных специалистов: сейчас мало научить студентов создавать чертежи с помощью САПР и читать проектно-конструкторскую документацию, но необходимо сразу готовить студентов к коллективному творчеству, ответственности перед коллективом за внесенные в проект изменения, а самое главное — показать принципы работы в программном продукте для информационного моделирования.

**Ключевые слова:** высшее образование, геометро-графические дисциплины, инженерная графика, компьютерная графика, BIM-технологии, информационное моделирование.

**Введение.** Внедрение компьютерной графики в графическую подготовку студентов позволило визуализировать учебный процесс, применять анимационные изображения на лекциях, моделировать изделия и по этим моделям делать чертежи, получать более точные результаты построения, что позволило ввести отдельную ветвь графической подготовки — вычислительную графику [1]. Процесс создания чертежей стал абсолютно компьютеризированным, синхронно развиваются возможности САПР и способы применения их функций на практике.

Но, помимо применения САПР, графическая подготовка сегодня должна давать не только навыки работы в одном или нескольких графических редакторах, но и готовить студентов к работе в современных условиях и быть готовыми осваивать новые технологии, которые появятся уже после окончания обучения.

Одним из таких направлений можно выделить BIM-технологии (Building Information Modeling), которые впервые начали применяться в сфере строительства и в настоящее время начинают применяться в различных сферах, в том числе в машиностроении.

**Постановка задачи.** С точки зрения развития компетенции по работе с проектно-конструкторской документацией, графическая подготовка — не только создание, но и работа с уже кем-то созданными чертежами. В настоящее время учебный процесс построен таким образом, что под этим понимается и формируется только умение читать чертежи. А как мы видим, BIM-технологии требуют от современного специалиста умения работать с современным программным обеспечением.

Анализ литературы показал, что специалисты в области графики пока не уделяют должного внимания вопросу обучения студентов этим технологиям. Сочетание запросов «BIM-технологии» и «графическая подготовка» на портале e-library.ru показал только один результат [2]. Тем временем это не только система создания графических изображений, но также система их хранения и обработки, своего рода система работы с проектной документацией. А если графическая подготовка предназначена для обучения инженеров-конструкторов и проектировщиков, то мы должны также научить будущих специалистов работать со своими и чужими проектно-конструкторскими документами.

Это может быть сегодня не столь актуально для машиностроительных специальностей, т.к. BIM-технологии только еще внедряются в некоторые сферы, чаще в экспериментальном звене, но для специальностей строительного факультета этот вопрос актуален уже сегодня.

**Теория.** Технологии информационного моделирования представляют собой новый подход к разработке проектов, отныне проектирование — это не создание плоских чертежей, а создание трехмерной модели объекта с последующим внесением дополнительной информации по любому элементу этой модели (архитектура, материал, стоимость, сроки монтажа и эксплуатации, смежные проекты коммуникаций и т.д.). В результате на каждом этапе жизненного цикла объекта можно получить исчерпывающую информацию. За счет этого резко уменьшаются ошибки, т.к. выявляются на ранних этапах проектирования. Стало возможным составить оптимальный график строительно-монтажных работ, а на этапе эксплуатации объекта — обновлять информацию по каждому конструктивному элементу в зависимости от его фактического состояния [3]. Еще одним кардинальным отличием стала возможность одновременно работать над проектом сотрудникам разных специальностей (архитекторы, проектировщики, дизайнеры, сметчики, инженеры, строители и др.).

Одним из первых упоминаний информационной модели здания приводят публикацию профессора Технологического института Чака Истмана под названием Building Description System в журнале AIA (Американский Институт Архитекторов) (1975). В 1986 году английским инженером Робертом Эйшем были сформулированы основные принципы информационного подхода к проектированию [4]:

- автоматическое составление чертежей;
- создание трехмерных объектов;
- интеллектуальная параметризация зданий;
- сведение баз данных;
- распределение этапов строительства во времени.

Практическое применение технологии было продемонстрировано в ходе реконструкции третьего терминала аэропорта Хитроу (Великобритания). С начала 2000-х годов термин «BIM-технологии» стал одним из ключевых в мировой строительной индустрии.

В Российской Федерации в 2014 году был опубликован приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации «Об утверждении Плана поэтапного внедрения технологий информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства» [5], а в 2021 году было принято постановление № 331, обязывающее с 1 января 2022 года применять BIM на объектах госзаказов [6].

Изначально информационное моделирование появилось в сфере строительства и до сих пор широко распространяется именно в сфере строительства чего-либо (уникальные сооружения, типовая малоэтажная застройка, мостостроение и т.д.). Но если рассмотреть основные принципы BIM-технологий, то получается, что это источник информации по цепочке «идея — рабочая документация проекта — возведение — эксплуатация — ремонт — снос». Примерно такую же цепочку можно составить в любой сфере, например, на изделие в машиностроении: «идея конструктора — рабочие чертежи — изготовление — установка на место эксплуа-

тации — эксплуатация — ремонт — утилизация». Если вся информация будет храниться в одном месте, доступная как разработчикам, так и пользователям, то появляется возможность не только избегать ошибок во время проектирования, но и проводить анализ эксплуатации изделия. К примеру, наглядно видно, что во время пяти ремонтов необходимо было заменить одну и ту же деталь. И далее вопрос к проектировщикам — почему это звено оказалось таким слабым и что можно сделать, чтобы не допускать таких поломок при проектировании следующих поколений подобных изделий?

Талапов В. В. отмечает [7], что информационная модель здания должна быть хорошо скоординированной, согласованной и взаимосвязанной, поддающейся расчетам и анализу, имеющей геометрическую привязку, пригодной к компьютерному использованию, допускающей необходимые обновления.

Такая модель о проектируемом или уже существующем объекте предназначена и может использоваться для [8]:

- принятия конкретных проектных решений;
- создания высококачественной проектной документации;
- предсказания эксплуатационных качеств объекта;
- составления смет и строительных планов;
- заказа и изготовления материалов и оборудования;
- управления возведением здания;
- управления эксплуатацией самого здания и средств его технического оснащения в течение всего жизненного цикла объекта;
- управления зданием как объектом экономической (коммерческой) деятельности;
- проектирования и управления реконструкцией или ремонтом здания;
- сноса и утилизации здания;
- иных связанных со зданием целей.

Среди недостатков внедрения информационного моделирования авторы выделяют финансовую часть [3, 9], человеческий фактор, недостаток программного обеспечения.

Маринин А. Н. выделил основные расходы, связанные с внедрением BIM-технологий: новое программное обеспечение, обучение сотрудников, консультации специалистов, обновление парка вычислительной техники, первоначальное снижение производительности труда.

Но большинство авторов пренебрегают первоначальными затратами в пользу будущего экономического роста и открывающихся перспектив [10–16].

Как уже отмечалось, отличительной особенностью работы с информационными моделями является возможность работать над проектом одновременно всем сотрудникам смежных отделов. И тут возникает сложность психологического характера: люди привыкли к индивидуальному труду в рамках своего отдела. Кроме того, необходимость работать в новом программном обеспечении также требует от специалистов усилий на выработку новых умений и навыков. Логичный спрос на курсы повышения квалификации сталкивается с недостаточностью выбора таких курсов, их направленностью на промышленное и гражданское строительство. После таких курсов даже в сфере строительства в дальнейшем приходится адаптировать полученные знания на практике, не говоря уже о сложности применения таких узкоспециализированных зна-

ний в других сферах проектирования (машиностроение, приборостроение и т.д.). В целом, решению проблемы человеческого фактора могла бы способствовать подготовка квалифицированных кадров еще на стадии получения высшего образования, но среди профессорско-преподавательского состава, на сегодняшний день, крайне мало специалистов, которые могли бы поделиться опытом применения BIM-технологий на практике.

С точки зрения методологии внедрения подготовки к работе с информационными моделями, автору видится введение в учебные планы отдельной дисциплины, в рамках которой студенты могли бы познакомиться с основными принципами BIM-технологий, наиболее распространенным программным обеспечением, попробовать создать коллективный проект здания или машиностроительного узла.

Лет 20–25 назад компьютерную графику рассматривали как отдельную часть графической подготовки, которая была выделена в продолжение изучения начертательной геометрии и инженерной графики. Сейчас можно предположить, что изучение BIM-технологий студентами также займет финишную позицию в графической подготовке на базе начертательной геометрии и интегрированных инженерной и компьютерной графики, но в дальнейшем BIM-технологии могут стать неотъемлемой частью инженерной компьютерной графики, в рамках которой не только изучаются правила создания чертежей и осваиваются САПР для их создания, но также изучаются основы работы с программным обеспечением для информационного моделирования.

Помимо нехватки специалистов, как уже отмечалось, в настоящее время идет процесс разработки отечественных различных программных продуктов, адаптация иностранных продуктов, их апробация на практике в различных отраслях [17, 18]. В связи с этим встает вопрос: какое именно программное обеспечение демонстрировать студентам, рассчитывая, что именно с ним они будут работать на производстве?

В настоящее время доступны в бесплатном, ознакомительном или платном доступе множество разработчиков, предлагающих свои программные продукты для информационного моделирования [19–22]. У всех отмечаются примерно одинаковые достоинства (возможность совместной работы над одним проектом, генерация документов в форматы .cdw или .pdf, автоматизация рутинных операций или создание сопутствующих спецификаций и т.д.), но при этом не считается недостатком невозможность отдельного продукта выполнить какую-либо задачу.

В этом перечне присутствуют и российские разработчики [15, 23–25], предлагающие в качестве отдельного преимущества встроенные российские государственные стандарты, строительные нормы и правила для российского строительства, а также продукты, изначально разрабатывавшиеся для строительства, но получившие дополнительные надстройки для возможности применения в машиностроении.

Анализ литературы за последние несколько лет показал, что в научных кругах больше внимания уделяется зарубежному программному обеспечению Revit [15, 26–27], что не может служить залогом лучшего продукта, но показывает, что он доступнее и более известен среди практиков.

**Выводы.** Мы живем в информационном веке, поэтому неудивительно, что компьютеризация кон-

ца XX века – начала XXI сменяется цифровизацией в большинстве отраслей деятельности человека. Относительно графической подготовки, которая по-прежнему остается одной из составляющих технического образования, это означает, что недостаточно современным студентам рассказать о правилах выполнения проектно-конструкторской документации и научить работать в одном из графических редакторов. Современные инженеры-конструкторы на рабочем месте будут создавать не чертежи, а информационные модели проектируемых объектов, для этого им необходимо:

- уметь создавать и читать проектно-конструкторскую документацию посредством САПР;
- знать об основных принципах информационного моделирования, его отличии от черчения в САПР;
- иметь навыки коллективного творчества над одним проектом;
- уметь работать в одном из программных продуктов по созданию информационных моделей проекта.

Профессорско-преподавательскому составу вузов необходимо готовиться к тому, что спустя 20–25 лет после компьютеризации создания чертежей в графическую подготовку студентов внедрится информационное моделирование, и, так же как сейчас, видятся неотъемлемыми друг от друга инженерная и компьютерная графика, станет неотъемлемой частью общей графической подготовки выпускников технических вузов.

#### Библиографический список

1. Савельев Ю. А., Черкасова Е. Ю. Вычислительная графика в решении нетрадиционных инженерных задач // Геометрия и графика. 2020. Т. 8, № 1. С. 33–44. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-33-44. EDN YBVMQZU.
2. Седлецька О. В. Прототип реальних споруд в інженерній графіці // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2020. № 2 (263-264). Р. 79–85. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.91.624. EDN AMFCUY.
3. Маринин А. Н. Проблемы использования технологии BIM в мостостроении // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2020. № 8. С. 711–718. EDN TMCBOK.
4. Доронин В. Ю., Матюшкин Д. Н. Внедрение 4D моделирования в практику деятельности строительной организации // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2022. Т. 7, № 3-2 (25). С. 42–45. EDN WJBUGK.
5. Об утверждении Плана поэтапного внедрения технологий информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства: приказ Минстроя России от 24 декабря 2014 г., № 926/пр. URL: <http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/383/prikaz-926pr.pdf> (дата обращения: 28.02.2023).
6. Фонтакина В. А., Савенко А. А., Самарский Е. Д. Роль BIM-технологий в организации и технологии строительства // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14, № 1. EDN IPTBYUB.
7. Талапов В. В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. Москва: ДМК Пресс, 2011. 392 с.
8. Талапов В. В. О некоторых принципах, лежащих в основе BIM // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 4 (688). С. 108–114.
9. Рыбин Е. Н., Амбарян С. К., Аносов В. В. [и др.]. BIM-технологии // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. № 9 (1). С. 98–105. EDN: HLTTRU.
10. Апатова Н. В., Узаков Т. К. Влияние информационных технологий в строительстве на экономический рост // Эко-

номика строительства и природопользования. 2018. № 4 (69). С. 17–24. EDN VXHXUU.

11. Байорис А. Р., Малиновский М. А., Ершов А. В. BIM-моделирование как технология повышения конкурентоспособности строительной отрасли // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. 2021. № 1. С. 79–83. DOI: 10.33764/2687-041X-2021-1-79-83. EDN YBFPSF.

12. Городнова Н. В., Шаблова Е. Г. Применение информационных технологий в концепции развития городов: экономико-правовые аспекты // Жилищные стратегии. 2019. № 3. С. 277–294. DOI: 10.18334/zhs.6.3.40892.

13. Городнова Н. В., Лемеза В. А. Применение BIM-технологий в цифровой экономике: мировой опыт и российская практика // Экономика, предпринимательство и право. 2022. Т. 12, № 8. С. 2241–2260. DOI: 10.18334/err.12.8.115082. EDN XSISOS.

14. Михайлова А. В., Сурков А. А. Применение BIM-технологий в строительной отрасли // Химия. Экология. Урбанистика. 2021. Т. 1. С. 63–67. EDN JGXRKL.

15. Николаева А. И. BIM-технологии как элемент современного строительства // Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки. 2021. № 11 (92). С. 27–31. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.92.1509. EDN ZKHLML.

16. Гевара Рада Л. Т., Пешков В. В., Мартыанов В. И. [и др.] Технологии информационного моделирования (BIM) как основа бережливого строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12, № 1 (40). С. 70–81. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-1-70-81. EDN TDEUOH.

17. Куприяновский В. П., Покусаев О. Н., Климов А. А. [и др.]. BIM на железных дорогах мира — развитие, примеры, стандарты // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Т. 8, № 5. С. 57–80. EDN XXOLBZ.

18. Технологии настоящего: BIM для промышленных объектов. URL: <https://neftegaz.ru/science/tsifrovizatsiya/672306-tekhnologii-nastoyashchego-bim-dlya-promyshlennykh-obektov/> (дата обращения: 28.02.2023).

19. Какое программное обеспечение (ПО) реализует технологию BIM? URL: <https://bimlab.ru/faq-bim-soft.html> (дата обращения: 28.02.2023).

20. Лучшие программы BIM моделирования для архитекторов и дизайнеров. URL: <https://3dradar.ru/post/47794/> (дата обращения: 28.02.2023).

21. Программы для BIM-проектирования. URL: <https://www.pss.spb.ru/stati/programmy-dlya-bim-proektirovaniya.html> (дата обращения: 28.02.2023).

22. Топ-10 программ для BIM-проектирования. URL: <https://www.planradar.com/ru/top-10-programm-dlya-bim-proektirovaniya/> (дата обращения: 28.02.2023).

23. Model StudioCS Строительные решения. URL: <https://www.mscad.ru/programs/mscad-aec.html> (дата обращения: 28.02.2023).

24. Программы для BIM-проектирования — список зарубежных и российских САПР, использующих разработки BIM-технологии. URL: <https://www.zsoft.ru/stati/programmy-dlya-bim-proektirovaniya--spisok--zarubezhnyh-i-rossijskih-sapr-ispolzuyushchih--razrabotki-bim-tehnologii> (дата обращения: 28.02.2023).

25. Топ-4 отечественных BIM-программ в сфере строительства. URL: <https://digital-build.ru/top-4-otechestvennyh-bim-reshenij-v-sfere-stroitelstva/> (дата обращения: 28.02.2023).

26. Бакулина И. В., Усова А. В., Бойкова А. В. Особенности использования технологии информационного моделирования (BIM-технологии) на примере программного обеспечения Revit // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 62-5. С. 80–83. DOI: 10.18411/lj-06-2020-103. EDN HBEFEV.

27. Усова А. В. Особенности Revit, как информационного моделирования (BIM-технологии) // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 85-3. С. 40–43. DOI: 10.18411/trnio-05-2022-103. EDN QSPWXY.

---

**НАЗАРОВА Жанна Анатольевна**, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения, г. Екатеринбург.

SPIN-код: 9431-4255

AuthorID (РИНЦ): 618778

ORCID: 0000-0001-7104-405X

Адрес для переписки: [zhnazarova2020@gmail.com](mailto:zhnazarova2020@gmail.com)

#### Для цитирования

Назарова Ж. А. Перспективы развития графической подготовки студентов технических вузов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 67–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-67-72.

Статья поступила в редакцию 01.03.2023 г.

© Ж. А. Назарова

## PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF GRAPHIC TRAINING OF STUDENTS OF TECHNICAL UNIVERSITIES

This article discusses the possibility of developing graphic training for students of technical specialties in the field of information modeling (building information modeling). Currently, building information modeling are an integral part of the construction industry all over the world, and the process of implementation in the Russian Federation is underway to maintain the competitiveness of developers both in the domestic market and in construction abroad. In parallel with the introduction in the construction sector, there are attempts to adapt information modeling in other industries. Against this background, the demand for specialists in the field of information modeling has increased, employees have to retrain not only to work with new software, but also to move away from individual creativity of individual employees or departments to collective work on one project simultaneously by all employees from their workplaces (perhaps even from different cities and countries). In parallel with this, various software being created in the field of information modeling, both in Russia and abroad, most of them are initially aimed at construction, but there are also adaptation options for other fields of activity.

In this regard, the issue of actual graphic training of modern specialists has arisen: now it is not enough to teach students to create drawings using CAD and read design documentation, but it is necessary to immediately prepare students for collective creativity, responsibility to the team for the changes made to the project, and most importantly — to show the principles of work in a software product for information modeling.

**Keywords:** higher education, geometric and graphic disciplines, engineering graphics, computer graphics, building information modeling, information modeling.

### References

1. Savel'yev Yu. A., Cherkasova E. Yu. Vychislitel'naya grafika v reshenii netraditsionnykh inzhenernykh zadach [Computational graphics in solving of non-traditional engineering problems] // *Geometriya i grafika. Geometry and Graphics*. 2020. Vol. 8, no. 1. P. 33–44. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-33-44. EDN YBMQZU. (In Russ.).
2. Sedlets'ka O. V. Prototip real'nykh sporud v inzhenerniy grafitsi [Prototype of real structures in engineering graphics] // *Visnik Pridniprovskoi derzhavnoi akademii budivnitstva ta arkhitekturi. Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2020. No. 2 (263-264). P. 79–85. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.91.624. EDN AMFCUY. (In Ukr.).
3. Marinin A. N. Problemy ispol'zovaniya tekhnologii BIM v mostostroyenii [Problems of using bim technology in bridge engineering] // *Elektronnyy setevoy politematicheskii zhurnal «Nauchnyye trudy KubGTU». Electronic Online Multidisciplinary Journal «Scientific Proceedings of Kuban State Technical University»*. 2020. No. 8. P. 711–718. EDN TMCBOK. (In Russ.).
4. Doronin V. Yu., Matyushkin D. N. Vnedreniye 4D modelirovaniya v praktiku deyatel'nosti stroitel'noy organizatsii [Introduction of 4D modeling into the practice of a construction organization] // *Mezhdunarodnyy zhurnal informatsionnykh tekhnologiy i energoeffektivnosti. International Journal of Information Technology and Energy Efficiency*. 2022. Vol. 7, no. 3-2 (25). P. 42–45. EDN WJBUGK. (In Russ.).
5. Ob utverzhdenii Plana po etapnogo vnedreniya tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya v oblasti promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva: prikaz Ministroya Rossii ot 24 dekabrya 2014 g., № 926/pr. [On Approval of the Plan for Phased Implementation of Information Modeling Technologies in Industrial and Civil Construction: Order of the Russian Ministry of Construction dated 24 December 2014, No. 926/pr]. URL: <http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/383/prikaz-926pr.pdf> (accessed: 28.02.2023). (In Russ.).
6. Fontokina V. A., Savenko A. A., Samarskiy E. D. Rol' BIM-tekhnologiy v organizatsii i tekhnologii stroitel'stva [The role of BIM technologies in the construction economy] // *Vestnik evraziyskoy nauki. The Eurasian Scientific Journal*. 2022. Vol. 14, no. 1. EDN IPTBYB. (In Russ.).
7. Talapov V. V. Osnovy BIM: vvedeniye v informatsionnoye modelirovaniye zdaniy [BIM basics: an introduction to building information modelling]. Moscow, 2011. 392 p. (In Russ.).
8. Talapov V. V. O nekotorykh printsipakh, lezhashchikh v osnove BIM [Some of the principles underlying the BIM] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2016. No. 4 (688). P. 108–114. (In Russ.).
9. Rybin E. N., Ambaryan S. K., Anosov V. V. [et al.]. BIM-tekhnologii [Bim technology] // *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. Proceedings of Universities. Investment. Construction*. 2019. No. 9 (1). P. 98–105. EDN HLTTRU. (In Russ.).
10. Apatova N. V., Uzakov T. K. Vliyaniye informatsionnykh tekhnologiy v stroitel'stve na ekonomicheskii rost [Influence of

information technologies in construction on economic growth] // Экономика строitel'stva i prirodopol'zovaniya. *Construction economic and environmental management*. 2018. No. 4 (69). P. 17–24. EDN VXHXUU. (In Russ.).

11. Bayoris A. R., Malinovskiy M. A., Ershov A. V. BIM-modelirovaniye kak tekhnologiya povysheniya konkurentnosposobnosti stroitel'noy otrasli [BIM-modeling as a technology to increase the competitiveness of the construction industry] // Regulirovaniye zemel'no-imushchestvennykh otноsheniy v Rossii: pravovoye i geoprostranstvennoye obespecheniye, otsenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskiye resheniya. *Regulation of Land and Property Relations in Russia: Legal and Geospatial Support, Real Estate Valuation, Ecology, Technological Solutions*. 2021. No. 1. P. 79–83. DOI: 10.33764/2687-041X-2021-1-79-83. EDN YBFPSP. (In Russ.).

12. Gorodnova N. V., Shablova E. G. Primeneniye informatsionnykh tekhnologiy v kontseptsii razvitiya gorodov: ekonomiko-pravovyye aspekty [The use of information technologies in the concept of urban development: economic and legal aspects] // Zhilishchnyye strategii. *Russian Journal of Housing Research*. 2019. No. 3. P. 277–294. DOI: 10.18334/zhs.6.3.40892. (In Russ.).

13. Gorodnova N. V., Lemeza V. A. Primeneniye BIM-tekhnologiy v tsifrovoy ekonomike: mirovoy opyt i rossiyskaya praktika [BIM technologies in the digital economy: world experience and Russian practice] // Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2022. Vol. 12, no. 8. P. 2241–2260. DOI: 10.18334/epp.12.8.115082. EDN: XSISOS. (In Russ.).

14. Mikhaylova A. V., Surkov A. A. Primeneniye BIM-tekhnologiy v stroitel'noy otrasli [application of BIM – technologies in the construction industry] // Khimiya. Ekologiya. Urbanistika. *Chemistry. Ecology. Urbanistics*. 2021. Vol. 1. P. 63–67. EDN JGXRKL. (In Russ.).

15. Nikolayeva A. I. BIM-tekhnologii, kak element sovremennogo stroitel'stva [BIM technology as an element of modern construction] // Evraziyskiy Soyuz Uchenykh. Seriya: tekhnicheskkiye i fiziko-matematicheskkiye nauki. *Eurasian Union of Scientists. Series: Technical, Physical and Mathematical Sciences*. 2021. No. 11 (92). P. 27–31. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.92.1509. EDN ZKHLML. (In Russ.).

16. Gevara Rada L. T., Peshkov V. V., Mart'yanov V. I. [et al.] Tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya (BIM) kak osnova berezhlivogo stroitel'stva [Building Information Modelling (BIM) technology as a basis for lean construction] // Izvestiya Vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. *Proceedings of Universities. Investment. Construction*. 2022. Vol. 12, no. 1 (40). P. 70–81. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-1-70-81. EDN TDEUOH. (In Russ.).

17. Kupriyanovskiy V. P., Pokusayev O. N., Klimov A. A. [et al.]. BIM na zheleznykh dorogakh mira — razvitiye, primery, standarty [BIM on the world's railways — developments, examples and standards] // International Journal of Open Information Technologies. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020. Vol. 8, no. 5. P. 57–80. EDN XXOLBZ. (In Russ.).

18. Tekhnologii nastoyashchego: BIM dlya promyshlennykh ob'yektov [Technologies of the present: BIM for industrial facilities]. URL: <https://neftgaz.ru/science/tsifrovizatsiya/672306-tekhnologii-nastoyashchego-bim-dlya-promyshlennykh-obektov/> (accessed: 28.02.2023). (In Russ.).

19. Kakoye programmnoye obespecheniye (PO) realizuyet tekhnologiyu BIM? [Which software implements BIM

technology?]. URL: <https://bimlab.ru/faq-bim-soft.html> (accessed: 28.02.2023). (In Russ.).

20. Luchshiyе programmy BIM modelirovaniya dlya arkhitektorov i dizaynerov [The best BIM modelling software for architects and designers]. URL: <https://3dradar.ru/post/47794/> (accessed: 28.02.2023). (In Russ.).

21. Programmy dlya BIM-proyektirovaniya [BIM design programmes]. URL: <https://www.pss.spb.ru/stati/programmy-dlya-bim-proektirovaniya.html> (accessed: 28.02.2023). (In Russ.).

22. Top-10 programm dlya BIM proyektirovaniya [Top 10 BIM design programmes]. URL: <https://www.planradar.com/ru/top-10-programm-dlya-bim-proektirovaniya/> (accessed: 28.02.2023). (In Russ.).

23. Model StudioCS Stroitel'nyye resheniya [Model Studio CS Building Solutions]. URL: <https://www.mscad.ru/programs/mscad-aec.html> (accessed: 28.02.2023). (In Russ.).

24. Programmy dlya BIM proyektirovaniya — spisok zarubezhnykh i rossiyskikh SAPR, ispol'zuyushchikh razrabotki BIM-tekhnologii [BIM software — list of foreign and Russian CAD systems that use BIM developments]. URL: <https://www.zsoft.ru/stati/programmy-dlya-bim-proektirovaniya--spisok--zarubezhnykh-i-rossiyskikh-sapr-ispolzuuyushchih--razrabotki-bim-tekhnologii> (accessed: 28.02.2023). (In Russ.).

25. Top-4 otechestvennykh BIM-programm v sfere stroitel'stva [Top 4 domestic BIM programmes in construction]. URL: <https://digital-build.ru/top-4-otechestvennykh-bim-reshenij-v-sfere-stroitelstva/> (accessed: 28.02.2023). (In Russ.).

26. Baklushina I. V., Usova A. V., Boykova A. V. Osobennosti ispol'zovaniya tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya (BIM-tekhnologii) na primere programmnoye obespecheniye Revit [Features of the use of Building Information Modelling (BIM) technology, using Revit software as an example] // Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya. *Trends in the Development of Science and Education*. 2020. No. 62-5. P. 80–83. DOI: 10.18411/lj-06-2020-103. EDN HBEFEV. (In Russ.).

27. Usova A. V. Osobennosti Revit, kak informatsionnogo modelirovaniya (BIM-tekhnologii) [Features of Revit as information modelling (BIM technology)] // Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya. *Trends in the Development of Science and Education*. 2022. No. 85-3. P. 40–43. DOI: 10.18411/trnio-05-2022-103. EDN QSPWXY. (In Russ.).

**NAZAROVA Zhanna Anatolyevna**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of Vehicle Design and Operation Department, Urals State Transport University, Ekaterinburg.

SPIN-code: 9431-4255

AuthorID (RSCI): 618778

ORCID: 0000-0001-7104-405X

Correspondence address: [zhnazarova2020@gmail.com](mailto:zhnazarova2020@gmail.com)

#### For citations

Nazarova Zh. A. Prospects for development of graphic training of students of technical universities // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 67–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-67-72.

Received March 01, 2023.

© Zh. A. Nazarova

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ПРИ ВЫБОРЕ ПЫЛЕОЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Одна из самых неблагоприятных операций с точки зрения пылеобразования в литейных, как конвейерного типа, так и серийного и индивидуального производства, — это выбивка опок. На этих участках наблюдается самая высокая среди работающих в литейном цехе общая заболеваемость. Для удаления газов и пыли от выбивных решеток устанавливаются механические отсосы, насыщенный пылью воздух с которых требует дальнейшей пылеочистки перед выбросом в атмосферу. Наибольшее распространение в системах очистки таких производств получили циклоны, но выбор самих пылеуловителей представляет собой нетривиальную задачу и требует системного подхода. В данной статье рассматривается метод подбора и расчета пылеочистительного оборудования на примере пыли литейных производств на основе метода анализа иерархий.

**Ключевые слова:** отчистка пыли, литейные производства, метод анализа иерархий, подбор пылеуловителя, параметры пылеуловителя, локальные векторы критериев, вектор глобальных приоритетов.

**Параметры пыли.** Литейное производство в своей основе до 75 % составляет многооперационный процесс, предполагающий работу как с сыпучими материалами, так и с аэрозолями. Активная работа создает в рабочих зонах опасные для здоровья взвеси с десятками вредных веществ.

Выделяющаяся при работе пыль приводит к профессиональным заболеваниям дыхательных путей и зрения [1].

Для подбора пылеочистительного оборудования сначала необходимо определиться с видом пыли, фракционным составом и основными параметрами, влияющими на ее дисперсность. Обычно фракционный состав определяют при помощи отбора проб пыли и просеивания ее через систему сит. В нашем случае это пыль с выбивных решеток и опок. Задаем ее частями от общей массы в процентном соотношении к диапазонам размеров частиц (табл. 1).

Тогда дисперсионные свойства пыли удобно описывать вероятностной функцией распределения  $m(d)$  (1):

$$m(d) = \frac{\sum_1^i \Phi_i(d \leq d_i)}{\sum_1^n \Phi_i}, \% \quad (1)$$

и можно записать в следующем виде (табл. 1).

Строим график распределения общей массы частиц пыли по фракциям  $\Phi(d_i)$  и массовой доли частиц пыли для фракций менее заданного размера  $m(d)$  (рис. 1).

На оси ординат (рис. 1) выделяем точки, соответствующие массовой доли пыли 15,9 %, 50 % и 84,1 %, для которых по интегральной кривой распределения находим соответствующие им значения диаметров частиц пыли в мкм:  $d_{15,9} = 19,6$ ;  $d_{50} = 37,1$ ;  $d_{84,1} = 65,2$ .

Находим среднеквадратическое отклонение диаметров частиц для нашей пыли:

$$\sigma' = \frac{d_{50}}{d_{15,9}} = 37,1/19,6 = 1,89;$$

$$\sigma'' = \frac{d_{84,1}}{d_{50}} = 65,2/37,1 = 1,76.$$

Теоретически значения  $\sigma'$  и  $\sigma''$  должны быть  $\sigma' \approx \sigma''$ . Однако на практике находят их среднее арифметическое (2):

$$\sigma_q = \frac{(\sigma' + \sigma'')}{2} = (1,89 + 1,76)/2 = 1,83. \quad (2)$$

При упрощенном построении номограммы по ГОСТ 12.2.043-80 на логарифмической вероятностной сетке получили, что заданная пыль относится к III группе: средне-дисперсная пыль (рис. 2). Если прямая или ломаная линия пыли пересекают границы нескольких групп, как в нашем случае, то принадлежность к группе определяется местом расположения медианного диаметра  $d_{50}$ .

**Метод анализа иерархий (МАИ)** применяется для решения задач охраны окружающей среды

Дисперсный состав пыли и массовая доля частиц

Размеры частицы пыли $d_3$ на границах фракций, мкм	< 5	5–10	10–20	20–40	40–60	60–100	>100
Распределение общей массы частиц пыли по фракциям, $\Phi_i$ , %	0,12	2,88	6	25	40	16	10
Массовая доля частиц пыли для фракций менее заданного размера, $m(d)$ , %	0,12	3	9	34	74	90	100

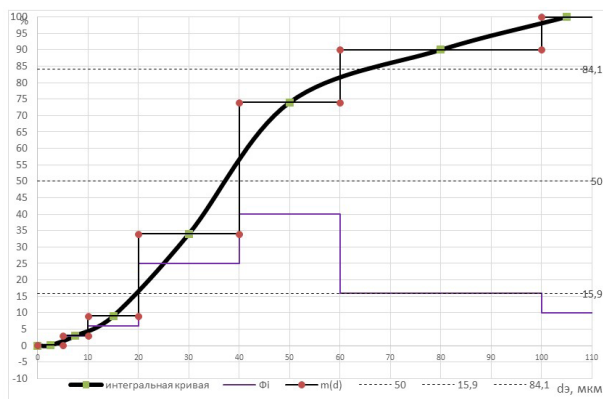
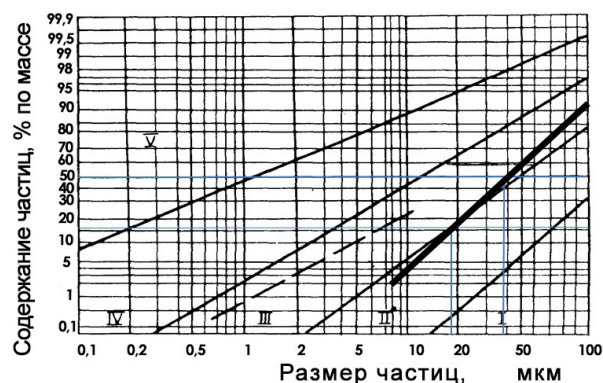
Рис. 1. Интегральный график распределения общей массы частиц пыли по фракциям  $m(d)$ 

Рис. 2. Классификационная номограмма пыли — горелая земля: отсос от выбивной решетки

и промышленной экологии, но в основном для выбора стратегий [2] или решения задач экономики или планирования [3, 4]. Одним из важных ограничений при таком подходе является небольшой выбор альтернатив и как вывод — предсказуемость результатов анализа, что иногда делает такую оценку тривиальной. Например, при выборе мест для полигонов ТБО не может быть много альтернатив в принципе, а фаворит набирает почти 50 % веса, что оставляет остальным альтернативам только роль статистов [3]. Гораздо интереснее применение МАИ при решении прикладных задач по оценке оборудования [5]. В данной работе авторы впервые предлагают использование метода анализа иерархий для подбора оборудования для пылеочистки. Во-первых, модельный ряд пылеуловителей имеет десятки наименований и типоразмеров, в которых необходимо выбрать оптимальный вариант, в чем и поможет нам МАИ. Кроме того, сейчас достаточно много производителей [6–8] и метод может получиться мульти уровневым, что делает задачу перспективной.

**Цель** — используем МАИ для подбора наилучшего варианта циклона для заданной пыли. Ограничимся сравнением циклонов одного производителя — например, ОАО «ЭНЕРГОМАШ» [7]. Авторы не оценивают производителей в данной работе. Мы просто используем характеристики однотипных циклонов и принимаем, что пылеуловители других производителей примерно соответствуют друг другу, а сравнение производителей выходит за рамки поставленной в данной работе задачи.

**Альтернативы** — модели циклонов. Подбор циклона проводился по выбранным критериям. Важно понимать, что критерии выбирает эксперт самостоятельно и их количество и типы будут меняться в зависимости от опыта эксперта и поставленной задачи.

Представим наиболее существенные критерии, имеющие отношение как к пылеочистителям, так и к пыли соответственно:

**Масса** — этот критерий один из важных и является заменителем критерия цена. Будем считать, что масса наиболее доступного пылеуловителя на рынке будет стремиться к минимальной, и, таким образом, будем подбирать альтернативы по этому критерию.

**Габаритные размеры: высота и диаметр** — приоритет данных критериев во многом будет зависеть от технических условий монтажа пылеуловителя и может рассматриваться как важный при наличии каких-либо ограничений. Оценка также будет вестись на минимизацию данных критериев за отсутствием специальных требований по габаритам и монтажу.

**Производительность** — этот критерий определяется технологическим процессом и влияет на массу и габариты устройства. Также производительность — это существенный показатель для пыли, так как влияет на степень ее очистки. Подбор оборудования будем производить по степени приближенности данного показателя к требуемому.

**Медианный диаметр частиц пыли** — как уже говорилось, это диаметр частиц, при котором очистка составит не менее 50 %. Будем считать, что лучшими показателями обладают те пылеуловители, у которых медианные значения наименьшие.

**Среднеквадратичное отклонение** — отражает дисперсность пыли, то есть количество фракций, которые входят в ее состав. При сравнении будем стремиться к совмещению значений среднеквадратичного отклонения пыли и оборудования.

Следует отметить, что мы выбрали для этого примера критерии, которые имеют только параметрическое выражение, но метод позволяет использовать в качестве критериев и чисто экспертные

Параметры пылеуловителей

		Масса, кг	Высота, мм	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Диаметр, мм	$d_{50}$ , мкм	lg $\sigma_T$
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
ЦН-11-800	A1	391	3615,00	5070	800,00	3,65	0,352
ЦН-15-600	A2	162	2536,00	3810	600,00	4,5	0,352
ЦН-24-600	A3	189	2556,00	4600	600,00	8,5	0,308
СДК-ЦН-33	A4	138	2660,00	3500	700,00	2,31	0,364
СК-ЦН-34	A5	105	2022,00	3500	700,00	1,95	0,308
СИОТ	A6	148	2900,00	4500	1200,00	2,6	0,28

Таблица 3

Вектор локальных приоритетов критериев

	Масса, кг	Высота, мм	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Диаметр, мм	$d_{50}$ , мкм	lg $\sigma_T$	Произведение	$x = (\Pi)^{(1/6)}$	$W_c = x/s$
	C1	C2	C3	C4	C5	C6			
C1	1	5	3	7	6	5	3150,0000	3,829	<b>0,44</b>
C2	1/5	1	1/7	1/3	1/3	1/4	0,0008	0,304	<b>0,03</b>
C3	1/3	7	1	5	3	4	140,0000	2,279	<b>0,26</b>
C4	1/7	3	1/5	1	1/4	1/3	0,0071	0,439	<b>0,05</b>
C5	1/6	3	1/3	4	1	1/2	0,3333	0,833	<b>0,10</b>
C6	1/5	4	1/4	3	2	1	1,2000	1,031	<b>0,12</b>
сумма	2,04	23,00	4,93	20,33	12,58	11,08	s =	<b>8,714</b>	1

$$\lambda_{\max} = \mathbf{6,526}$$

$$ИС = \mathbf{0,105}$$

$$ОС = \mathbf{0,085}$$

оценки, например, как особенности работы оборудования, положительные или отрицательные отзывы, как об оборудовании, так и о сервисных услугах, гарантии производителей, бренде и т.п.

Исходя из поставленной задачи, имеем следующие заданные и расчетные критерии выбранной пыли:

1. Объем воздуха, подвергаемый очистке, 3500 м<sup>3</sup>/ч.

2. Медианный диаметр частиц пыли  $d_{50} = 37,1$  мкм.

3. Логарифм среднеквадратичного отклонения  $\lg \sigma_T = 0,26$ .

Данные по циклонам возьмем из технической документации и с сайтов производителей оборудования для очистки [7, 9]. Объединим эти данные в табл. 2, одновременно подбирая модели пылеуловителей по параметру объема воздуха для очистки, которые должны быть равны или меньше значения параметра производительности устройства. Обыч-

но производительность устройств задается при помощи диапазона, поэтому будем ориентироваться на его крайне максимальное значение.

**Принцип сравнительных суждений.** Чтобы вычислить приоритеты критериев и подобрать оценки для альтернативных решений, в МАИ используется метод парных сравнений [10]. Рассмотрим применение принципа на примере сравнения приоритетов критериев, выбранных ранее. Будем сравнивать веса критериев между собой на основе суждений, ранжируя их по степени превосходства одного критерия над другим (табл. 3). Шкала предпочтений, как правило, выбирается от 1 до 9. Например, сравнивая **Массу** и **Производительность**, примем во внимание, что масса, в нашем случае, является эквивалентом цены и имеет наивысший приоритет, но производительность — это критерий, который определяет мощность установки и уступает умеренно в соответствии со шкалой предпочтений [10]. Таким образом, Масса примет значение 3, а Про-

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию *Масса*

	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СИОТ	П	$x = (\Pi)^{1/6}$	$W_m$
Масса, кг	A1	A2	A3	A4	A5	A6			
A1	1	1/6	1/5	1/8	1/9	1/7	0,0001	0,201	0,02
A2	6	1	4	1/4	1/6	1/2	0,5000	0,891	0,10
A3	5	1/4	1	1/3	1/5	1/2	0,0417	0,589	0,07
A4	8	4	3	1	1/2	2	96,0000	2,140	0,25
A5	9	6	5	2	1	3	1620,0000	3,427	0,40
A6	7	2	2	1/2	1/3	1	4,6667	1,293	0,15
сумма	36,00	13,42	15,20	4,21	2,31	7,14	s =	8,540	1

$$\lambda_{\max} = 6,358$$

$$ИС = 0,072$$

$$ОС = 0,058$$

Таблица 5

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию *Высота*

	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СИОТ	П	$x = (\Pi)^{1/6}$	$W_h$
Высота, мм	A1	A2	A3	A4	A5	A6			
A1	1	1/7	1/6	1/5	1/9	1/4	0,0001	0,226	0,03
A2	7	1	2	3	1/3	4	56,0000	1,956	0,22
A3	6	1/2	1	2	1/4	3	4,5000	1,285	0,15
A4	5	1/3	1/2	1	1/5	2	0,3333	0,833	0,09
A5	9	3	4	5	1	7	3780,0000	3,947	0,45
A6	4	1/4	1/3	1/2	1/7	1	0,0238	0,536	0,06
сумма	32,00	5,23	8,00	11,70	2,04	17,25	s =	8,782	1

$$\lambda_{\max} = 6,235$$

$$ИС = 0,047$$

$$ОС = 0,038$$

изводительность обратное ему — т.е. 1/3. Сравнивая **Производительность** с **Высотой** изделия, прием превосходство как значительное и назначим отношение их весов как 7 и 1/7 соответственно. Таким образом, заполним всю таблицу сравнения приоритетов критериев (табл. 3). Используя подобную методику, создаем матрицы приоритетов пылеуловителей относительно каждого из выбранных критериев (табл. 4–9). В этом случае альтернативы (пылеуловители) сравниваются между собой по отношению к выбранному критерию.

**Расчет локальных векторов приоритетов.** Для каждой матрицы мы рассчитываем локальные векторы приоритетов сравниваемых элементов иерархии. Нормируем каждую строку матрицы по формуле (3):

$$x = \sqrt[l]{C_1 \cdot C_2 \cdot \dots \cdot C_n}, \quad (3)$$

где значение степени и количество элементов соответствует размерности матрицы сравнений  $l$  (в нашем случае  $l=6$ ), а локальный весовой коэффициент  $w_i$ , индекс согласованности (ИС) и отно-

шение согласованностей — ОС будем рассчитывать согласно методике, представленной в [10]. При этом ОС не должно быть больше 0,1, что говорит о согласованности суждений эксперта. По опыту решения задач при помощи МАИ можно утверждать, что при значениях, значительно превышающих требуемое, следует исследовать полученную матрицу на предмет радикально обратных суждений, то есть вопрос обычно заключается не в степени важности, а в принципиально ошибочном, обычно обратном суждении. При нахождении такого суждения и «перевертывании» его в матрице ОС приходит в соответствие без дополнительных усилий.

Расчеты будем проводить с помощью программного обеспечения Microsoft Excel как наиболее гибкого и доступного инструмента, не требующего специальной подготовки пользователя. На основании вышеизложенного рассчитаем вектор локальных приоритетов критериев (табл. 3). В данной и последующих таблицах будем выделять градациями серого цвета веса локальных приоритетов от светлого к темному для наглядности распределения весовых коэффициентов.

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию *Производительность*

Производительность, м <sup>3</sup> /ч	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СИОТ	П	x = (П)^(1/6)	Wp
	A1	A2	A3	A4	A5	A6			
A1	1	1/7	1/4	1/9	1/9	1/3	0,0001	0,230	0,02
A2	7	1	6	1/2	1/2	5	52,5000	1,935	0,21
A3	4	1/6	1	1/7	1/7	3	0,0408	0,587	0,06
A4	9	2	7	1	1	6	756,0000	3,018	0,32
A5	9	2	7	1	1	6	756,0000	3,018	0,32
A6	3	1/5	2	1/6	1/6	1	0,0333	0,567	0,06
сумма	33,00	5,51	23,25	2,92	2,92	21,33	s =	9,355	1

$$\lambda_{\max} = 6,586$$

$$ИС = 0,117$$

$$ОС = 0,095$$

Таблица 7

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию *Диаметр*

Диаметр, мм	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СИОТ	П	x = (П)^(1/6)	Wd
	A1	A2	A3	A4	A5	A6			
A1	1	1/3	1/6	1/5	1/4	1/2	0,0014	0,334	0,04
A2	3	1	1	3	3	8	216,0000	2,449	0,30
A3	6	1	1	2	2	9	216,0000	2,449	0,30
A4	5	1/3	1/2	1	1	8	6,6667	1,372	0,17
A5	4	1/3	1/2	1	1	8	5,3333	1,322	0,16
A6	2	1/8	1/9	1/8	1/8	1	0,0004	0,275	0,03
сумма	21,00	3,13	3,28	7,33	7,38	34,50	s =	8,202	1

$$\lambda_{\max} = 6,339$$

$$ИС = 0,068$$

$$ОС = 0,055$$

Таблица 8

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию *d<sub>50</sub>*

d <sub>50</sub> , мкм	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СИОТ	П	x = (П)^(1/6)	Wd <sub>50</sub>
	A1	A2	A3	A4	A5	A6			
A1	1	1/2	1/4	3	6	4	9,0000	1,442	0,17
A2	2	1	1/3	4	6	5	80,0000	2,076	0,24
A3	4	3	1	6	7	4	2016,0000	3,554	0,42
A4	1/3	1/4	1/6	1	3	1/2	0,0208	0,525	0,06
A5	1/6	1/6	1/7	1/3	1	1/3	0,0004	0,276	0,03
A6	1/4	1/5	1/4	2	3	1	0,0750	0,649	0,08
сумма	7,75	5,12	2,14	16,33	26,00	14,83	s =	8,522	1

$$\lambda_{\max} = 6,429$$

$$ИС = 0,086$$

$$ОС = 0,069$$

Вектор локальных приоритетов пылеуловителей по критерию  $lg \sigma$ 

$lg \sigma$	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СИОТ	П	$x = (\Pi)^{1/6}$	$W\sigma$
	A1	A2	A3	A4	A5	A6			
A1	1	1	1/5	2	1/5	1/7	0,0114	0,475	0,05
A2	1	1	1/5	2	1/5	1/7	0,0114	0,475	0,05
A3	5	5	1	4	1	1/6	16,6667	1,598	0,19
A4	1/2	1/2	1/4	1	1/4	1/5	0,0031	0,382	0,04
A5	5	5	1	4	1	1/2	50,0000	1,919	0,22
A6	7	7	6	5	2	1	2940,0000	3,785	0,44
сумма	19,50	19,50	8,65	18,00	4,65	2,15	$s =$	8,634	1

$$\lambda_{\max} = 6,519$$

$$ИС = 0,104$$

$$ОС = 0,084$$

Таблица 10

Расчет вектора глобальных приоритетов

$Wc$	0,44	0,03	0,26	0,05	0,10	0,12	1,00
	Масса, кг	Высота, мм	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Диаметр, мм	$d_{50}$ , мкм	$lg \sigma$	$Wg$
$W$	$Wm$	$Wh$	$Wp$	$Wd$	$Wd_{50}$	$W\sigma$	
ЦН-11	0,02	0,03	0,02	0,04	0,17	0,05	0,042
ЦН-15	0,10	0,22	0,21	0,30	0,24	0,05	0,153
ЦН-24	0,07	0,15	0,06	0,30	0,42	0,19	0,129
СДК-ЦН-33	0,25	0,09	0,32	0,17	0,06	0,04	0,217
СК-ЦН-34	0,40	0,45	0,32	0,16	0,03	0,22	0,314
СИОТ	0,15	0,06	0,06	0,03	0,08	0,44	0,145

В результате расчета видно, что наибольшим весом обладают критерии массы (цены) — 0,44 и производительности — 0,26. Такой расклад наиболее характерен для пылей, где значения медианных диаметров соответствуют I–III классам пыли и не оказывают значительного влияния на выбор пылеочистительного оборудования.

Далее переходим к составлению матриц по расчету локальных приоритетов альтернатив по каждому выявленному критерию, используя методику, приведенную выше. Если в предыдущем случае мы сравнивали между собой критерии и выявляли наиболее важные из них, то теперь мы будем рассматривать, каким образом различные пылеуловители будут удовлетворять выбранным критериям и выявлять лучшие установки по каждому из них.

Ниже приведены расчеты локальных приоритетов альтернатив по критериям (табл. 4–9).

Несмотря на наличие непосредственных значений параметров установок, эксперт может внести изменения в оценочное суждение с учетом конструктивных особенностей, например, толщины стенок устройства или показателей виброиспытаний.

По локальному приоритету Масса наибольший вес получила модель СК-ЦН-34. По локальному приоритету Высота наибольший вес получила мо-

дель СК-ЦН-34. По локальному приоритету Производительность наибольший вес разделили сразу две модели: СК-ЦН-34 и СДК-ЦН-33.

По локальному приоритету Диаметр лидерство принадлежит моделям марки ЦН.

В нашем случае медианный диаметр пыли имеет значение, в несколько раз превышающее значения расчетных медианных диаметров для установок, поэтому локальный вектор будем рассчитывать исходя из выбора установки с наиболее «грубой» очисткой от ЦН-24. В дальнейшем посмотрим, как этот фактор будет влиять на конечный результат.

Наилучшим совпадением дисперсности заданного образца пыли и пылеуловителя обладает установка СИОТ.

Следует обратить внимание, что по локальным приоритетам определились разные лидеры, и конечный результат будет зависеть во многом от распределения вектора приоритетов критериев.

Векторы локальных приоритетов альтернатив ( $Wm$ ,  $Wh$ ,  $Wp$ ,  $Wd$ ,  $Wd_{50}$ ,  $W\sigma$ ) (табл. 4–9) в совокупности представляют собой матрицу  $n \times n$ , которая умножается на матрицу столбец  $Wc$  — вектора локальных приоритетов критериев (табл. 3). В результате мы получаем матрицу столбец  $Wg$  (табл. 10), которая и определяет глобальные приоритеты альтернатив с учетом приоритетов критериев.

В нашем случае наибольшим рейтингом обладает пылеуловитель СК-ЦН-34, наименьшее значение будет принадлежать циклону ЦН-11.

Стоит отметить, что данный метод позволяет сделать первичную оценку при выборе оборудования и требует уточнения параметров при помощи расчета. Кроме того, если пылеуловитель, который получил наивысшую оценку, по каким-либо причинам не будет доступен на рынке, его можно заменить следующим по рейтингу устройством.

**Расчет пылеуловителя СК-ЦН-34.** Исходные данные представлены в [9].

Количество очищаемого газа при рабочих условиях $Q$ , м <sup>3</sup> /с	0,972
Плотность газа при рабочих условиях $\rho_r$ , кг/м <sup>3</sup>	1,128
Динамическая вязкость газа при рабочей температуре 40 °С $\mu_r$ , Па·с	$1,91 \cdot 10^{-5}$
Медианный размер частиц пыли $d_{50}$ , мкм	37,1
Параметр среднеквадратичного отклонения $\sigma$	1,83
Плотность частиц $\rho_{ch}$ , кг/м <sup>3</sup>	2450

Параметры, определяющие эффективность этого циклона со степенью очистки  $\eta = 50\%$  для тарировочной пыли, представлены как:

$$d_{50}^T = 1,95 \text{ мкм}; \lg \sigma^T = 0,308; v_{\text{отт}} = 1,7 \text{ м/с}.$$

Значения тарировочной пыли  $d_{50}^T$  соответствуют следующим условиям:  $v_{\text{отт}}^T = 3,5$ ;  $D_T = 0,6$  м;  $\rho^T = 1930$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_r = 22,2 \cdot 10^{-6}$  Па·с. [9].

Вычисляем площадь сечения, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{Q}{V_{\text{отт}}} = \frac{0,972}{1,7} = 0,572 \text{ м}.$$

Диаметр циклона, при количестве циклонов  $N=1$ :

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 \cdot N}} = \sqrt{\frac{0,572}{0,785 \cdot 1}} = 0,854 \text{ м}.$$

Диаметр циклона принимаем 0,8 м.

Действительная скорость газа в циклоне, м/с:

$$v = \frac{Q}{0,785 \cdot N \cdot D} = \frac{0,972}{0,785 \cdot 1 \cdot 0,8^2} = 1,935 \text{ м/с}.$$

Скорость газа  $v$  в циклоне не должна отклоняться от  $v_{\text{отт}}$  более чем на 15 %.

$$\frac{|v_{\text{отт}} - v|}{v_{\text{отт}}} \cdot 100\% = \frac{|1,7 - 1,935|}{1,7} \cdot 100\% = 13,8\% < 15\%.$$

Потери давления в циклоне:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = 1150 \cdot \frac{1,128 \cdot 1,935^2}{2} = 2428,895 \text{ Па},$$

где  $\xi$  — коэффициент гидравлического сопротивления аппарата [9].

Значение  $d_m$  характеризует параметры дисперсного состава заданной очищаемой пыли для рабочих условий выбранного циклона:

$$d_m = d_{50}^T \sqrt{\frac{D \cdot \rho_r^T \cdot \mu_r \cdot v_T}{D_T \cdot \rho_{ch} \cdot \mu_T \cdot v}}$$

$$= 1,95 \sqrt{\frac{0,8 \cdot 1930 \cdot 1,91 \cdot 10^{-5} \cdot 3,5}{0,6 \cdot 2450 \cdot 2,22 \cdot 10^{-5} \cdot 1,935}} = 2,493 \text{ мкм}.$$

Тогда параметр  $x$ :

$$x = \frac{\lg \frac{d_{50}}{d_m}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_T + \lg^2 \sigma}} = \frac{\lg \frac{37,1}{2,493}}{\sqrt{0,308^2 + \lg^2 1,83}} = 2,898.$$

Определяем значение функции нормального распределения  $F_0(x)$ , представляющее собой полный коэффициент очистки газа  $\eta$  в центробежном циклоне по табличным значениям [9]:

$$\eta = 100 \cdot F_0(x) = 100 \cdot F_0(2,9) = 100 \cdot 0,9981 = 99,8\%.$$

Коэффициент очистки газа в СК-ЦН-34-800 составляет 99,8 %.

**Результаты и их обсуждение.** В этой статье был рассмотрен пример подбора оборудования пылеочистки для литейных производств, а точнее, пыль от выбивки литейных опок III класса. Подбор пылеуловителя предложенным методом МАИ позволил найти циклон с оптимальным соотношением цена — качество и выявил сильные и слабые стороны конкурентов. Давайте рассмотрим результаты применения метода и укажем на достоинства и недостатки.

Для начала рассмотрим конечные результаты по выбору циклона на рис. 3. Видно, что значения имеют явно выраженную экспоненциальную зависимость и это говорит о корректной логике соотношения критериев и оценке альтернатив. От-

Общая оценка марок циклонов

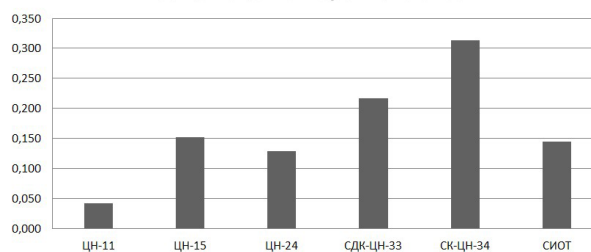


Рис. 3. Приоритеты выбора циклонов

Значение суммарных коэффициентов в зависимости от типа циклона

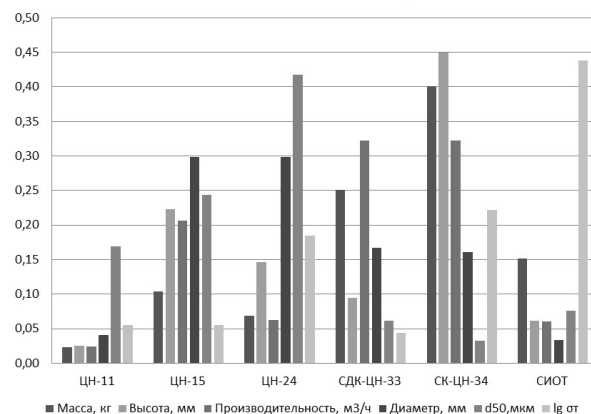


Рис. 4. Распределение значений коэффициентов по маркам циклонов

ставание от лидера — циклона СК-ЦН-34 явно выражено, но оставляет нам другие альтернативы для маневра. Так, циклон СДК-ЦН-33 будет также хорошим выбором при возникновении трудностей с приобретением или установкой лидера данного теста. Далее идет устойчивая группа из трех циклонов и замыкает рейтинг циклон ЦН-11, который не является худшим с точки зрения характеристик, но просто уступает конкурсантам при данном наборе критериев и логических установок для анализа методом иерархий.

Если раскрыть соотношения коэффициентов, то картина приобретает больше деталей и позволяя судить о нюансах (рис. 4).

Например, видно, что наиболее усредненными показателями обладает циклон ЦН-15 и при определенных условиях он может стать лидером в данной группе. Кроме того, мы намеренно приняли наибольший параметр  $d_{50}$  как востребованный. При изменении дисперсности такое допущение уже не будет возможным. Одним словом, параметры и критерии пылеуловителей или пыли это своеобразный конструктор для оценки и выбора оптимального оборудования. Кроме того, в оценку могут быть включены условия гарантии производителя, сроки доставки и изготовления, а также показатели надежности или шума при работе.

В заключение хочется отметить, что данный метод следует использовать при решении маркетинговых и инженерных задач выбора пылеочистительного оборудования разных типов на производстве в качестве первого приближения и обоснования выбора того или иного типа оборудования. Более точные характеристики обеспечивает приведенный в работе непосредственный расчет с учетом дополнительных параметров, таких как скорость потока, плотность пыли и поправочные коэффициенты.

#### Библиографический список

1. Лазаренков А. М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов // *Литье и металлургия*. 2019. № 2. С. 138–142. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-138-142. EDN UDYUOH.
2. Иволга А. Г., Елфимова Ю. М., Радишаускас Т. А. Методические основы выбора инновационной стратегии охраны окружающей среды // *Инновационное развитие экономики*. 2019. № 1 (49). С. 35–43. EDN DCEJTD.
3. Шилова Ю. В., Гладун И. В. О применении метода анализа иерархий для выбора мест строительства полигонов ТКО на не урбанизированных территориях // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2020. № 3 (40). С. 81–89. DOI: 10.24412/2227-1384-2020-10041. EDN TWWKFS.

4. Юганова Т. И. Выбор участков для размещения объектов обращения с отходами на основе методов многокритериального принятия решений // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2019. № 4. С. 79–93. DOI: 10.31857/S0869-78092019479-93. EDN ARIGTW.

5. Jagtap H. P., Bewoor A. K. Use of Analytic Hierarchy Process Methodology for Criticality Analysis of Thermal Power Plant Equipments // *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4, Issue 2, Part A. P. 1927–1936. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.038.

6. Концерн Медведь Юр: пылеулавливающее оборудование. URL: <http://concernmedved-ug.ru/pyleulavlivayushcheye-oborudovaniye> (дата обращения: 09.11.2022).

7. ОАО «ЭНЕРГОМАШ»: Аппараты сухой очистки газов. URL: [http://www.energomash-tver.ru/apparaty\\_sukhoj\\_ochistki\\_gazov](http://www.energomash-tver.ru/apparaty_sukhoj_ochistki_gazov) (дата обращения: 09.11.2022).

8. СИБЭЛКОН: циклонные пылеуловители. URL: <https://sibelkon.ru/produkciya/pyleulavlivayushhee-oborudovanie/ciklonnye-filtry/> (дата обращения: 15.12.2022).

9. Биргер М. И., Вальдберг А. Ю., Мягков В. И. [и др.]. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под общ. ред. А. А. Русанова. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.

**СОЛОМИН Вячеслав Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2972-5037

AuthorID (РИНЦ): 440725

Адрес для переписки: v\_solomin@mail.ru

**ШТРИПЛИНГ Лев Оттович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9285-8565

ORCID: 0000-0002-2622-9108

AuthorID (SCOPUS): 56504001800

ResearcherID: T-8953-2018

#### Для цитирования

Соломин В. Ю., Штриплинг Л. О. Использование метода анализа иерархий при выборе пылеочистительного оборудования литейного производства // *Омский научный вестник*. 2023. № 2 (186). С. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-73-81.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023 г.

© В. Ю. Соломин, Л. О. Штриплинг

## USING THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD WHEN CHOOSING DUST CLEANING EQUIPMENT FOR FOUNDRY

One of the most unfavorable operations in terms of dust affect in foundries of both conveyor type and serial and individual production is the knocking out of flasks. In these areas, the highest overall incidence among workers in the foundry is observed. To remove gases and dust from knock-out gratings, mechanical exhausts are installed, the dust-saturated air from which requires further dust cleaning before being released into the atmosphere. Cyclones are the most widely used in dust cleaning systems of such industries, but the choice of dust collectors is a non-trivial task and requires a systematic approach. This article discusses the method of selection and calculation of dust-cleaning equipment on the example of foundry dust based on the hierarchy analysis method.

**Keywords:** dust cleaning, foundries, hierarchy analysis method, dust collector selection, dust collector parameters, local criteria vectors, global priorities vector.

### References

1. Lazarenkov A. M. Issledovaniye vozdukhа rabochikh zon liteynykh tsekhov [A study of the air quality of working areas in foundries] // *Lit'ye i metallurgiya. Foundry Production and Metallurgy*. 2019. No. 2. P. 138–142. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-138-142. EDN UDYIOH. (In Russ.).

2. Ivolga A. G., Elfimova Yu. M., Radishauskas T. A. Metodicheskiye osnovy vybora innovatsionnoy strategii okhrany okruzhayushchey sredy [Methodical bases of the choice innovative strategy for environmental protection] // *Innovatsionnoye razvitiye ekonomiki. Innovative Development of Economy*. 2019. No. 1 (49). P. 35–43. EDN DCEJTD. (In Russ.).

3. Shilova Yu. V., Gladun I. V. O primeneniі metoda analiza iyerarkhiy dlya vybora mest stroitel'stva poligonov TKO na ne urbanizirovannykh territoriyakh [Application of the analytic hierarchy process for selection of construction locations of the MSW landfills in non-urbanized territories] // *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema. Bulletin of Sholom Aleichem Priamur State University*. 2020. No. 3 (40). P. 81–89. DOI: 10.24412/2227-1384-2020-10041. EDN TWWKFS. (In Russ.).

4. Yuganova T. I. Vybór uchastkov dlya razmeshcheniya ob'yektov obrashcheniya s otkhodami na osnove metodov mnogokriterial'nogo prinyatiya resheniy [Selection of sites for allocation of waste disposal objects based on the multicriteria decision-making methods] // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2019. No. 4. P. 79–93. DOI: 10.31857/S0869-78092019479-93. EDN ARIGTW. (In Russ.).

5. Jagtap H. P., Bewoor A. K. Use of Analytic Hierarchy Process Methodology for Criticality Analysis of Thermal Power Plant Equipments // *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4, Issue 2, Part A. P. 1927–1936. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.038. (In Engl.).

6. Kontsern Medved' Yug: pyleulavlivayushcheye oborudovaniye [Concern Medved South: Dust extraction equipment]. URL: <http://concernmedved-ug.ru/pyleulavlivayushcheye-oborudovaniye> (accessed: 09.11.2022). (In Russ.).

7. OAO «ENERGOMASH»: Apparaty sukhoy ochistki gazov [ENERGOMASH: Dry gas scrubbers]. URL: [http://www.energomash-tver.ru/apparaty\\_sukhoj\\_ochistki\\_gazov](http://www.energomash-tver.ru/apparaty_sukhoj_ochistki_gazov) (accessed: 09.11.2022). (In Russ.).

8. SIBELKON: tsiklonnyye pyleuloviteli [SIBELCON: cyclone dust collectors]. URL: <https://sibelkon.ru/produkcziya/pyeulavlivayushchee-oborudovanie/ciklonnye-filtry/> (accessed: 15.12.2022). (In Russ.).

9. Birger M. I., Val'dberg A. Yu., Myagkov V. I. [et al.]. Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu [Dust and ash collection handbook] / ed. by A. A. Rusanov. Moscow, 1983. 312 p. (In Russ.).

10. Saati T. Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy [Decision-making. Hierarchy analysis method] / trans. from Engl. R. G. Vachnadze. Moscow, 1993. 278 p. (In Russ.).

**SOLOMIN Vyacheslav Yuryevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Industrial Ecology and Safety Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2972-5037

AuthorID (RSCI): 440725

Correspondence address: [v\\_solomin@mail.ru](mailto:v_solomin@mail.ru)

**SHTRIPLING Lev Ottovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Industrial Ecology and Safety Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9285-8565

ORCID: 0000-0002-2622-9108

AuthorID (SCOPUS): 56504001800

ResearcherID: T-8953-2018

### For citations

Solomin V. Yu., Shtripling L. O. Using the Hierarchy Analysis Method when choosing dust cleaning equipment for foundry // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-73-81.

Received January 10, 2023.

© V. Yu. Solomin, L. O. Shtripling

## ПЛАСТИЧНЫЕ ФОРМЫ АРХИТЕКТУРЫ В DYNAMO-REVIT И GRASSHOPPER-RHINO-ARCHICAD

В статье представлены результаты исследования по работе со связками Dynamo-Revit и Grasshopper-Rhino-Archicad при создании пластичных архитектурных форм сложной геометрии. В качестве моделей для исследования были выбраны объекты Лотос, Навес, Параметрический павильон, Параметрическая кирпичная стена, Малая архитектурная форма, Беседка, Балочная конструкция. Для представленных архитектурных объектов были выбраны наименее ресурсоемкие ноды и их связки, позволяющие оптимально использовать возможности программ и не перегружать ресурсы компьютера. Кратко описаны сценарии, разработанные в программах Dynamo и Grasshopper для создания представленных моделей. Приведены созданные скрипты, использованные для работы с моделями. Кратко проанализированы возможности программ Dynamo и Grasshopper для визуального (параметрического) программирования. Изучены некоторые возможности работы их связок с Revit и Archicad соответственно. Была проанализирована двусторонняя работа пакетов Dynamo-Revit и Grasshopper-Rhino-Archicad для импорта-экспорта модели, в том числе при изменении кода для корректировки модели. Целесообразно продолжить работу в этом направлении, чтобы получить более лаконичные и универсальные алгоритмы (цепочки узлов), позволяющие варьировать исходные данные и варианты формы пластических архитектурных объектов.

**Ключевые слова:** параметрическое программирование, визуальное программирование, Dynamo, Revit, Grasshopper, Archicad, Rhino, моделирование, сложная геометрия.

**Введение.** В современной архитектуре всё чаще возникает необходимость работы с объектами сложной геометрии [1, 2]. Для создания моделей архитектурных форм сложной геометрии удобно использовать визуальное (параметрическое) программирование, например, в связках Dynamo-Revit и Grasshopper-Rhino-Archicad [3–11]. Такой вид программирования позволяет достаточно быстро и наглядно создавать скрипты и получать модели сложных объектов для дальнейшей работы с ними в других программных комплексах, например, в Autodesk Revit и Graphisoft Archicad, стандартные инструменты которых не всегда позволяют создавать элементы сложной геометрии.

Открытый код Dynamo и Grasshopper предоставляет удобную возможность контроля используемых инструментов. Связки Dynamo-Revit и Grasshopper-Rhino-Archicad передают созданную модель в обоих направлениях этих связок, что позволяет постоянно контролировать результат в виде 3D-модели и своевременно вносить необходимые корректировки в скрипт, которые практически мгновенно отражаются в модели, экспортированной в другую программу этой связки.

**Актуальность проведённого исследования.** В процессе работы над архитектурными проектами

регулярно возникает необходимость моделирования различных сложных архитектурных объектов с последующим встраиванием полученной модели в проект в соответствующих программах BIM, таких как Archicad и Revit и др. Эта задача либо не решается стандартными инструментами указанных программ, либо приводит к значительному увеличению веса файла, который не может быть использован в работе во всех системах проектной организации. Требуется упрощение модели при снижении ресурсозатрат компьютера при работе с этой моделью.

Для решения этой проблемы удобно использовать программы визуального программирования, например, Grasshopper и Dynamo. Отечественных аналогов программ такого уровня, использующих именно визуальное программирование, пока не существует.

Отечественная BIM программа Renga в настоящее время значительно отстаёт от зарубежных аналогов Archicad и Revit, поэтому работать со сложными объектами в программе Renga не представляется возможным.

Для моделирования конкретных объектов, которые требуются для проектирования архитектурной среды, существует крайняя необходимость в раз-

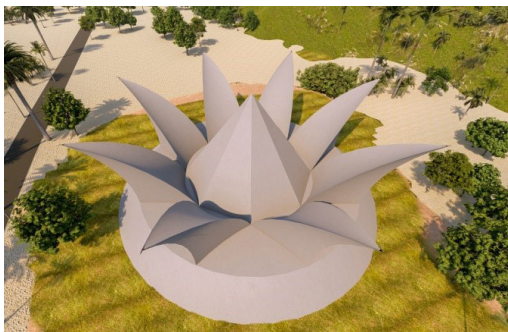


Рис. 1. Объект Лотос в пространственной среде

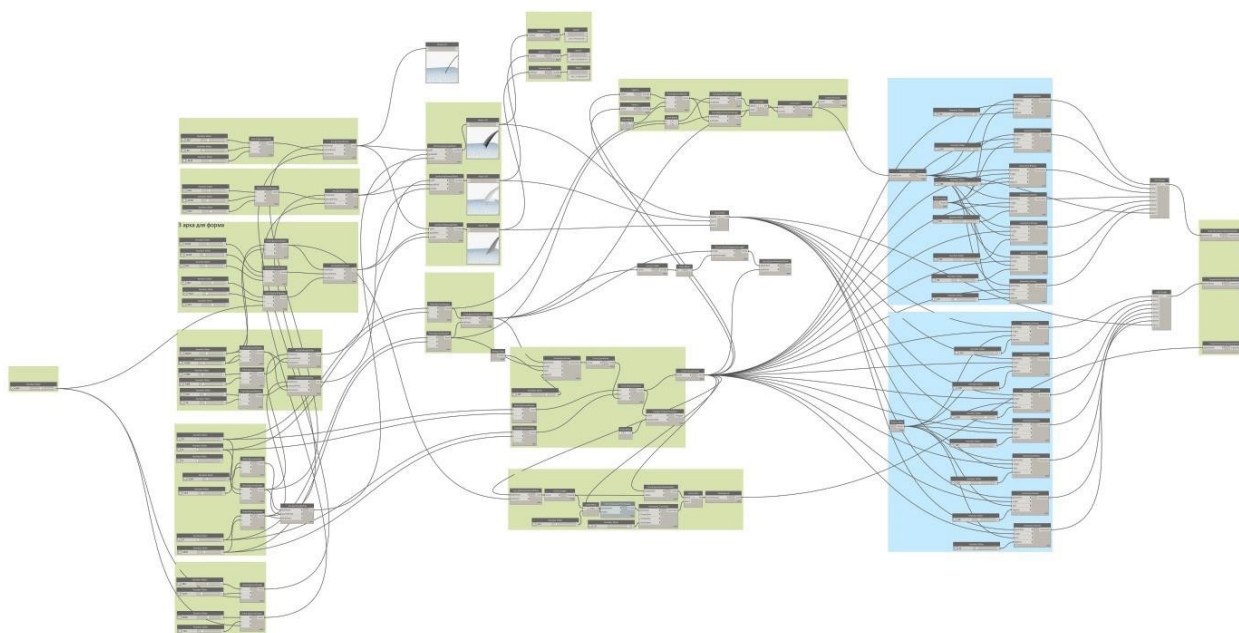


Рис. 2. Общий вид разработанного скрипта для создания модели Лотос

работке оптимальных скриптов. Именно решению подобных вопросов и посвящена статья.

**Научная новизна исследования.** В процессе создания моделей сложных архитектурных форм был проведён сравнительный анализ изменения параметров систем компьютера при работе с моделями одного и того же объекта, но сформированными по разным скриптам (различные варианты узлов и их связей в программном коде). В результате были выбраны наиболее оптимальные скрипты для каждого конкретного объекта, не перегружающие системы компьютера.

**Постановка задачи.** Целью работы являлась разработка скриптов для создания моделей пластичных архитектурных форм сложной геометрии в связках Dynamo-Revit и Grasshopper-Rhino-Archicad. Также ставилась задача изучения двунаправленной работы связки этих программ при экспорте моделей и внесении корректировок в открытый код Dynamo и Grasshopper для изменения моделей.

Для этого были созданы модели следующих объектов:

1. Лотос.
2. Навес.
3. Параметрический павильон.
4. Параметрическая кирпичная стена.
5. Малая архитектурная форма.
6. Беседка.
7. Балочная конструкция.

Эти архитектурные объекты были выбраны не случайно, т. к. разработка этих моделей потребовалась архитекторам при проектировании реальных объектов, а смоделировать их стандартными инструментами Revit или Archicad было практически невозможно или приводило к значительному усложнению проекта, а следовательно, к увеличению объёма и трудоёмкости реализации файла. В результате с файлом можно было бы работать не на каждом компьютере проектной организации, а на разработку такой модели было бы потрачено необоснованно большое количество человеко-часов.

Одной из основных задач исследования, результаты которого приведены в этой статье, был поиск наиболее оптимального решения с точки зрения снижения затрат ресурсов компьютера в процессе создания моделей на основе разработанных скриптов. В ходе исследования использовались различные узлы, аналогичные по работе, и их связки, позволяющие получить представленные модели. Анализировались изменения параметров системы при работе с разными скриптами для одной и той же модели. Наиболее оптимальные коды представлены в этой работе.

**Модель Лотос.** Для создания объекта Лотос (рис. 1) сначала были созданы арки для лепестков. Для этого использовался инструмент **ArcByThreePoints**.

Далее формировались поверхности лепестков. В то же время концептуально обосновано было ис-



Рис. 3. Навес в пространственной среде

пользование инструмента **BySweep2Rails**, который позволяет выдавливать профиль сечения лепестка по траектории и дополнительной направляющей.

Сформирована конструкция из 8-ми лепестков. Используются ноды **Circle.ByThreePoints**, **Polygon.RegularPolygon**.

Далее была создана нижняя часть объекта на основе усечённого конуса.

Созданный объект Лотос был экспортирован в Autodesk Revit для дальнейшей работы с ним. Для этого был использован инструмент **ImportInstance.ByGeometries**.

Разработанный скрипт для создания модели объекта Лотос представлен на рис. 2.

**Модель Навес.** Для создания Навеса (рис. 3) была сформирована арка.

Создание траектории арки производилось по опорной линии и трём точкам. Для этого использовались ноды **Curve.TrimByParameter**, **Curve.PointAtParameter**, **ArcByThreePoints**.

Затем была создана изогнутая поверхность с 16-ю линиями на ней. Далее формировалась изогнутая поверхность заданной формы.

Затем была создана объёмная форма на основе полученной изогнутой поверхности, осуществлена подрезка её краёв. Также произведён расчёт площади и объёма полученной формы.

Полученная модель навеса приведена на рис. 4.

Общий вид разработанного скрипта для создания модели Навеса представлен на рис. 5.

**Параметрический павильон.** Процедура создания Параметрического павильона была разбита на три основных этапа (рис. 6):

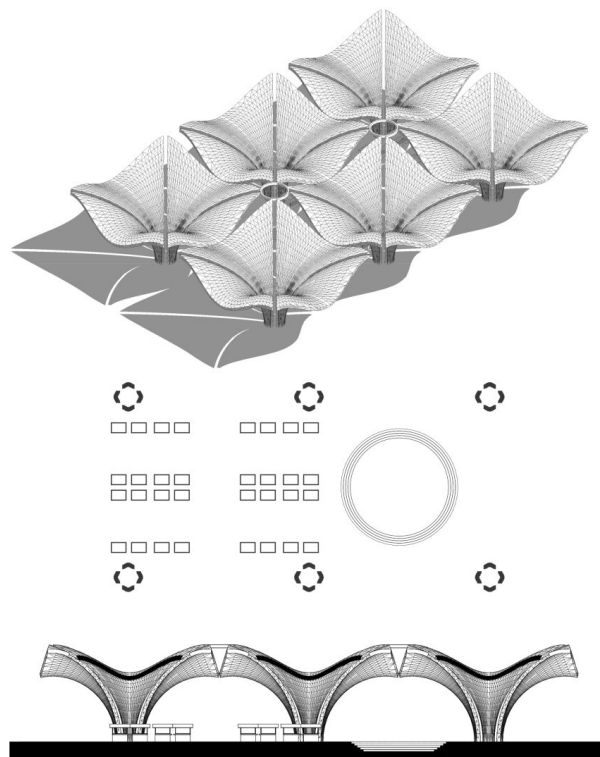


Рис. 4. Модель Навеса

1. Создание массива стен.
2. Формирование проходов.
3. Вычитание объёмов.

Для создания массива стен (по двум направлениям) использованы ноды **PoligonByPoints**, **CurveExtrudeAsSolid**.

Для формирования объёмов, которые затем вычитались из полученного массива стен, использовались инструменты **SolidByLoft**, **Solid.DifferenceAll**. Были созданы три объёма, которые были удалены из объёма массива стен.

Модель Параметрического павильона была импортирована в Autodesk Revit для дальнейшей работы с ней. Для этого был использован инструмент **ImportInstanceByGeometriesAndView**.

Общий вид разработанного скрипта для создания модели Параметрического павильона представлен на рис. 7.

**Параметрическая кирпичная стена.** Для создания параметрической кирпичной стены (рис. 8) были использованы программы **RhinoCeros-5** и **Grasshopper**.

Сначала были созданы четыре кривые линии, соединённые между собой инструментом **Loft**. За-

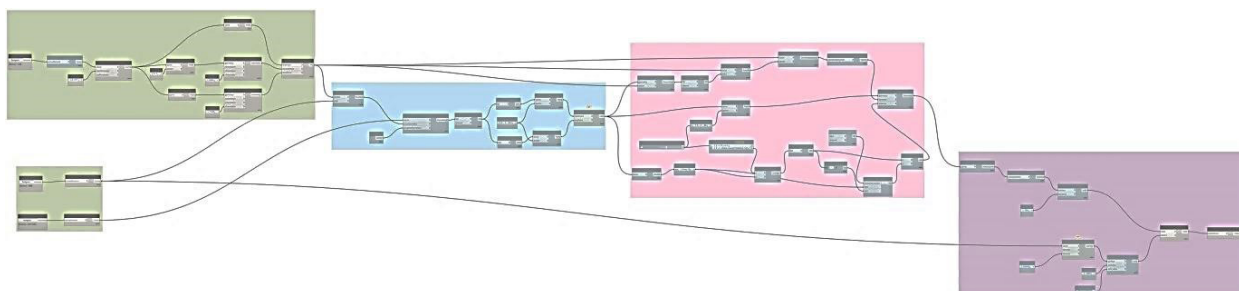


Рис. 5. Общий вид скрипта для создания Навеса

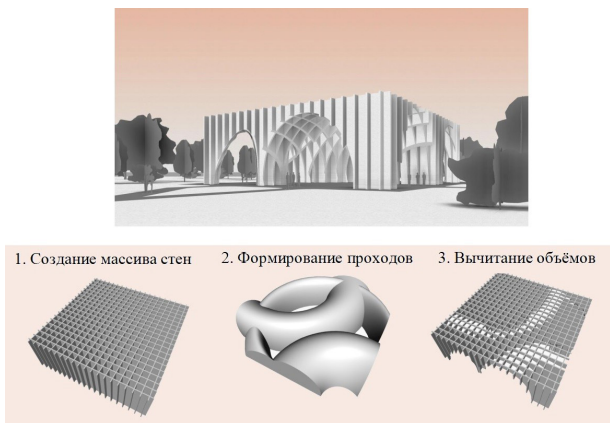


Рис. 6. Параметрический павильон и основные этапы его создания

тем с помощью модификатора **Box** было произведено моделирование кирпича, имеющего стандартные размеры. Каждая плоскость будущей параметрической стены была разделена на горизонтальные плоскости в соответствии с высотой кирпича (модификатор **Contours**). Используя модификатор **Horizontal frames**, были назначены новые точки каждой горизонтальной линии. К этим точкам в дальнейшем присоединялись кирпичи. Были использованы модификаторы **Brep** и **List**. С помощью инструментов **Geometry** и **Orient** назначалось позиционирование кирпича. Общий вид разработанного скрипта представлен на рис. 9.

**Малая архитектурная форма.** Для моделирования малой архитектурной формы (рис. 10), состоящей из навеса, скамьи и клумбы, были заданы основные кривые линии, образующие форму. Для разработки скрипта также использовалась операция **Loft**.

Навес, скамья и клумба моделировались отдельно друг от друга. Моделирование скамьи производилось на основе принципа создания перпендикулярных плоскостей относительно заданной ранее кривой, а в основу для формирования поверхности навеса заложен морф.

**Беседка.** Создание беседки (рис. 11) в **Rhinceros** начинается с моделирования двух кривых. Затем к нодам **Curve** подключаются эти созданные кривые. К нодам **Curve** также подключаются два нода **Divide Curve**, производится деление на равные отрезки — 19. К ноду **Line** подключаются два слота **Points** нодов **Divide Curve** для соединения точек двух прямых. К ноду **Line** подключается инструмент **Point on Curve**. При этом ползунок, определяющий положение разделительных точек отрезков, устанавливается в положение среднего значения 0,500.

Срединные точки отрезков поднимаются на требуемую высоту с помощью нода **Move**, также к слоту **Geometry** подключается **Point on Curve**. Ось **Z** подключается к слоту **Motion**. Слот **Number** нода **Range** подводится к **Number Slider** для назначения количества точек на кривых, чтобы подъём точек имел более сложную форму.

Для назначения кривой подъёма точек использовался нод **Graph Mapper** (вид графика Sin). Он подключается к ноду **Range**. Для инструмента **Multiplication** к компоненту **A** подключается нод **Graph Mapper** (синусоида), высота заданной синусоиды задаётся через компоненту **B**. К ноду **Multiplication** подключается ось **Z**.

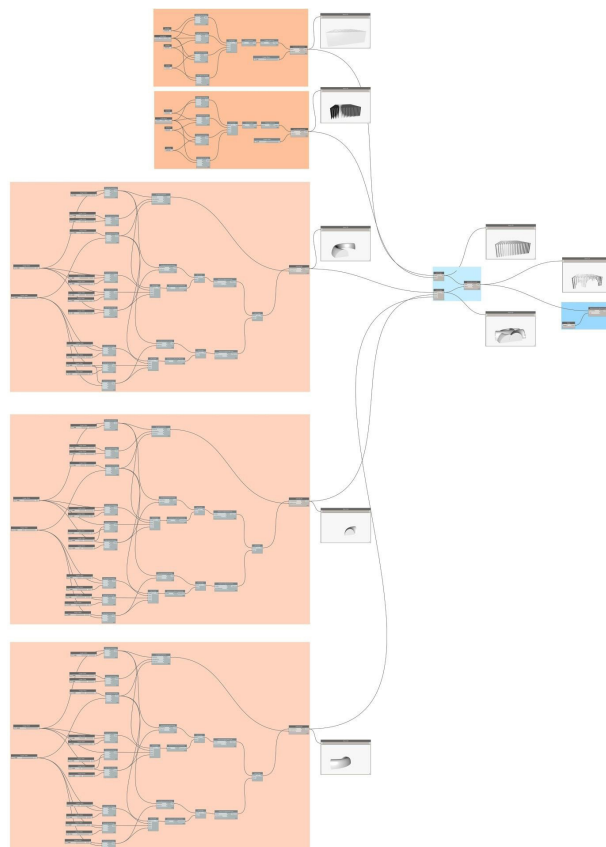


Рис. 7. Общий вид скрипта для Параметрического павильона

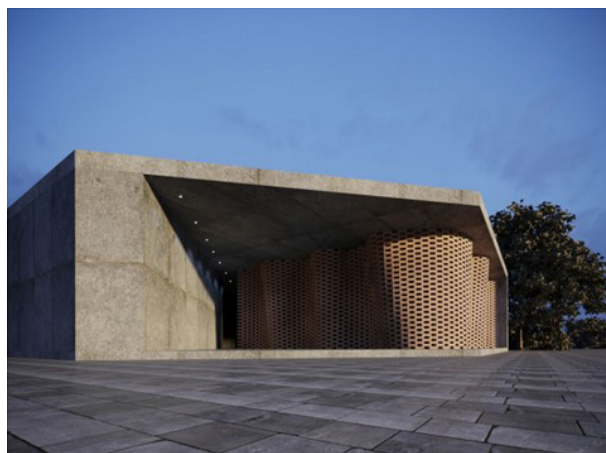


Рис. 8. Параметрическая кирпичная стена

Для формирования каркаса требуемой формы к компоненту **A** нода **Arc 3pt** подключаются точки первой кривой. К компоненту **C** нода **Arc 3pt** подключаются точки второй кривой. К компоненту **B** нода **Arc 3pt** подключается слот **B** нода **Move**. Затем нод **Loft** подключается к слоту **Arc** нода **Arc 3pt** для создания требуемой поверхности.

Нод **Mesh Surface** использовался для разделения полученной поверхности на сегменты. К слоту **Surface** нода **Mesh Surface** подключен нод **Loft**.

Для получения именно сглаженной поверхности для слотов **U-Count** и **V-count** назначается количество полигонов.

К ноду **Mesh Surface** подключен нод **Triangulate**, в результате чего производится разбиение на пря-

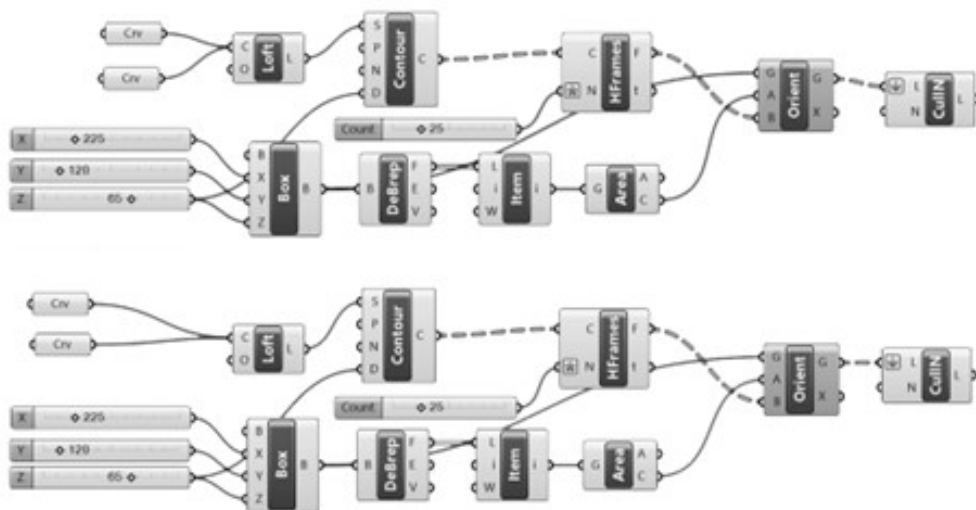


Рис. 9. Скрипт для формирования параметрической кирпичной стены



Рис. 10. Малая архитектурная форма



Рис. 11. Беседка

моугольники. Также были использованы плагин **Wb** и нод **WBFrame**. Для полученной сетчатой формы назначаются ширина и толщина рам, величины которых при необходимости могут быть изменены пользователем. Далее необходимо подключить нод **Morph** от **Archicad** для преобразования полученной формы в морф.

**Балочная конструкция.** Для моделирования балочной конструкции (рис. 12) создаются два прямоугольника с требуемыми размерами в **Archicad**. Далее необходимо синхронизировать **Archicad** и **Grasshopper**.

Следующие действия по созданию скрипта производятся в **Grasshopper**. Контроль полученного результата осуществляется как в **Grasshopper**, так и в **Archicad**.

Построенные ранее прямоугольники из **Archicad** подгружаются непосредственно в **Grasshopper**, затем преобразуются в кривые **Curve** (инструмент **2D Curve**).

С помощью инструментов **Move** и **Unit Z** больший из прямоугольников поднимается на требуемую высоту, которая при необходимости может быть в дальнейшем изменена. При этом для выбора вершин прямоугольников используется инструмент **Control Polygon**. Соединяются вершины двух прямоугольников посредством кривых линий. При этом с помощью **Vector 2Pt** устанавливается вектор направления каждой кривой.

Между кривыми, соединяющими вершины прямоугольников, создаются поверхности. Для этого используются инструменты **Loft** и **Flip Curve**.

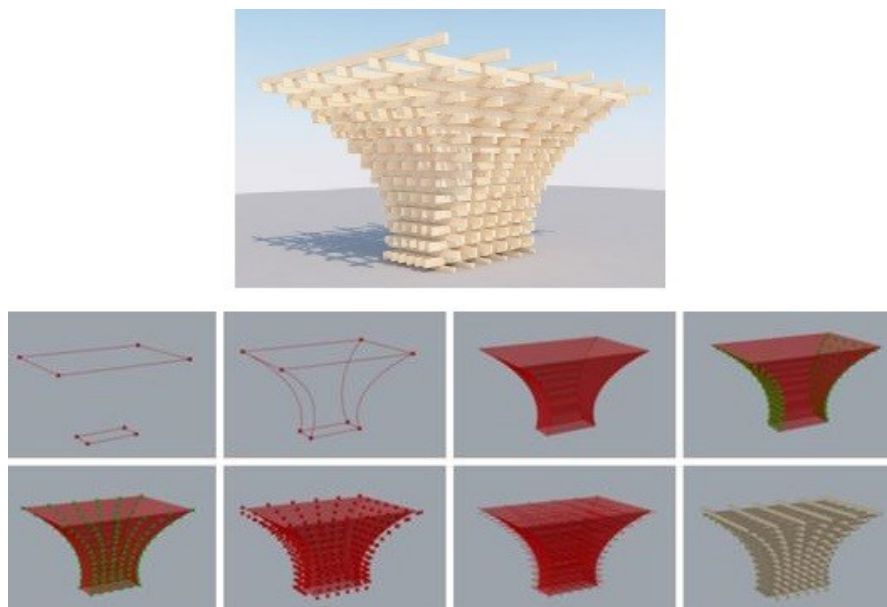


Рис. 12. Балочная конструкция и этапы её создания

Инструментами **Contour** и **Divide Curve** (с переменной **Count 5**) производится деление на части линий, принадлежащих поверхностям, находящимся друг напротив друга.

Осуществляется выбор точек на чётных линиях этих поверхностей (инструменты **Flip Matrix**, **Cull Pattern**, **Range**).

Используя инструменты **Contour**, **Divide Curve** (с переменной **Count 5**), производится деление на части линий, расположенных на двух оставшихся противоположных поверхностях. С использованием инструментов **Flip Matrix**, **Cull Nth** производится выбор точек на нечётных линиях этих поверхностей.

Выбранные точки перемещаются на требуемое расстояние, например, на 700. Для этого используются инструменты **Move**, **Unit XY**, **Unit Y**. Величина этого расстояния также может быть изменена в любой момент для получения модели с другими требуемыми параметрами.

Полученные точки соединяются попарно (инструмент **Line**). В результате формируются линии, по которым инструментами **Beam (Beam Setting Rectangular)** размещаются балки, для которых назначаются необходимые параметры, например, высота, ширина, материал.

В результате сформированная модель балочной конструкции экспортируется в **Archicad** для дальнейшей работы с ней.

**Результаты исследования и выводы.** Для представленных объектов были разработаны и проанализированы различные варианты скриптов в программах **Grasshopper** и **Dynamo**. В статье представлены и кратко описаны только результаты проведённого исследования, а именно наиболее оптимальные коды для каждого из объектов. Промежуточные варианты скриптов в статье не представлены ввиду нецелесообразности.

Приведённые программные коды для представленных архитектурных объектов могут успешно использоваться архитекторами и проектировщиками в их практической деятельности.

Представленные скрипты являются результатом исследования по сравнению аналогичных по работе узлов, а также их связок, и выявлению наиболее

оптимальных вариантов по нагрузке на ресурсы компьютера.

Работа в связках **Dynamo-Revit** и **Grasshopper-Rhino-Archicad** для создания пластичных архитектурных форм сложной геометрии предоставляет возможность получения уникальных форм. Двухсторонняя работа связок по импорту-экспорту модели даёт возможность быстро и корректно изменять модель, дорабатывая её до требуемых параметров.

Связки рассмотренных программ могут быть использованы не только для создания сложных архитектурных форм, но и в других отраслях науки и техники при работе с элементами сложной геометрии.

Планируется продолжение работы в этом направлении. Для исследования будут выбраны более сложные модели, созданные на основе представленных, а также и новые объекты, используемые в реальных архитектурных проектах.

#### Библиографический список

1. Гоголкина А. В. Особенности формирования конструкций в параметрической архитектуре // Архитектура и современные информационные технологии. 2018. № 1 (42). С. 355 – 363.
2. Бжахов М. И., Ефимова М. М., Журтов А. В. Алгоритмическое проектирование в архитектуре // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2 (49). С. 166.
3. Кравченко Г. М., Труфанова Е. В., Манойленко А. Ю. [и др.]. Применение информационного моделирования при исследовании уникальных объектов параметрической архитектуры // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 128 – 134.
4. Анисимова Н. В. Обзор основных плагинов среднего моделирования и оптимизации геометрии в **Dynamo** и **Grasshopper** // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры (Санкт-Петербург, 15–17 мая, 2019 г.): материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2019. С. 228 – 233. DOI: 10.23968/BIMAC.2019.042.
5. Hongming L., Yu J. The parametric modeling of one heterotypic building basing on **Rhino** and **Grasshopper** // Новые идеи нового века: материалы междунар. науч. конф. Фад Тогу. Хабаровск, 2017. Т. 2. С. 202 – 207.

6. Жуков В. С., Зацепин Е. П. Основы визуального программирования в Дупато для проектирования в Revit // Цифровая трансформация в энергетике (Тамбов, 21–22 декабря 2021 г.): материалы III Всерос. науч. конф. Тамбов, 2022. С. 103–105.

7. Перцева А. Е., Хижняк Н. С., Радаев А. Е. Алгоритм проектирования конструкций сложной конфигурации с использованием средств автоматизации (на примере Autodesk Revit, Autodesk Autocad и Дупато) // Транспортные сооружения. 2018. Т. 5, № 4. С. 4. DOI: 10.15862/04SATS418.

8. Андреев И. И., Мальцев В. Л. Расширенное использование возможностей Autodesk Revit на основе дополнения Dinamo // Информационные и графические технологии в профессиональной и научной деятельности (Тюмень, 27 ноября 2017 г.): сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Тюмень, 2017. С. 124–127.

9. Каренгин Г. В., Есипов А. В. Дупато как способ расширения возможностей Autodesk Revit // Информационные и графические технологии в профессиональной и научной деятельности (Тюмень, 30 ноября 2018 г.): сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. Тюмень, 2018. С. 216–218.

10. Валенсия Э., Рынкoвская М. И. Расширение моделирования в программе Revit с помощью Дупато // Научному прогрессу — творчество молодых (Йошкар-Ола, 17–18 апреля 2015 г.): материалы X Междунар. молодеж. науч. конф. по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Йошкар-Ола, 2015. С. 95–97.

11. Ларин В. С., Клашанов Ф. К. Параметрическое моделирование в связке трех аппаратных комплексов Archicad, Rhinoceros, Grasshopper // Студенческий. 2019. № 10 (54). С. 6–11.

**ШУМИЛОВ Константин Августович**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 4916-9517

AuthorID (РИНЦ): 826294

AuthorID (SCOPUS): 57226893414

ORCID: 0000-0003-2079-6774

Адрес для переписки: shkas@mail.ru

**ГУРЬЕВА Юлиана Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3262-5546

AuthorID (РИНЦ): 510965

ORCID: 0000-0002-5814-423X

Адрес для переписки: yual2017@mail.ru

#### Для цитирования

Шумилов К. А., Гурьева Ю. А. Пластичные формы архитектуры в Дупато-Revit и Grasshopper-Rhino-Archicad // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 82–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-82-90.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023 г.

© К. А. Шумилов, Ю. А. Гурьева

## PLASTIC FORMS OF ARCHITECTURE IN DYNAMO-REVIT AND GRASSHOPPER-RHINO-ARCHICAD

The paper presents the results of research on working with the Dynamo-Revit bundle and Grasshopper-Rhino-Archicad bundle when creating plastic architectural forms of complex geometry. Lotus, Canopy, Parametric Pavilion, Parametric Brick Wall, Small architectural form, Pergola, Beam structure objects are chosen as models for the researching. For the presented architectural objects the least resource intensive nodes and their bundles are selected. Nodes and their bundles in such a way as to optimally use the capabilities of programs and not overload computer resources are selected. The scripts developed in the Dynamo and Grasshopper programs for creating the presented models are briefly described. Explanations for the most significant fragments and full scripts used to work with models are given. The possibilities of the Dynamo and Grasshopper programs for visual (parametric) programming are briefly analyzed. Some possibilities of work of its bundle with Revit and Archicad are studied. The two-way work of the Dynamo-Revit bundle and Grasshopper-Rhino-Archicad bundle for import-export of the model is analyzed, including when changing the code to correct the model. It is advisable to continue working in this direction in order to obtain more concise and universal algorithms (chains of nodes) that allow varying the initial data and options for the shape of plastic architectural objects.

**Keywords:** parametric programming, visual programming, Dynamo, Revit, Grasshopper, Archicad, Rhino, modeling, complex geometry.

### References

1. Gogolkina A. V. Osobennosti formirovaniya konstruksiy v parametricheskoy arkhitekture [Constructions formation features in the parametric architecture] // *Arkhitektura i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii. Architecture and Modern Information Technologies*. 2018. No. 1 (42). P. 355–363. (In Russ.).
2. Bzhakhov M. I., Efimova M. M., Zhurtov A. V. Algoritmicheskoye proyektirovaniye v arkhitekture [Algorithmic design in architecture] // *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don*. 2018. No. 2 (49). P. 166. (In Russ.).
3. Kravchenko G. M., Trufanova E. V., Manoylenko A. Yu. [et al.]. Primeneniye informatsionnogo modelirovaniya pri issledovanii unikal'nykh ob'yektov parametricheskoy arkhitektury [Application of information modeling research the unique building of parametric architecture] // *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don*. 2019. No. 1 (52). P. 128–134. (In Russ.).
4. Anisimova N. V. Obzor osnovnykh pluginov sredovogo modelirovaniya i optimizatsii geometrii v Dynamo i Grasshopper [Overview of the main environment modelling and geometry optimization plugins in Dynamo and Grasshopper] // *BIM-modelirovaniye v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury. BIM modelling for Construction and Architecture*. St. Petersburg, 2019. P. 228–233. DOI: 10.23968/BIMAC.2019.042. (In Russ.).
5. Hongming L., Yu J. The parametric modeling of one heterotypic building basing on Rhino and Grasshopper // *Novyye idei novogo veka. New Ideas for a New Century*. Khabarovsk, 2017. Vol. 2. P. 202–207. (In Engl.).
6. Zhukov V. S., Zatsepin E. P. Osnovy vizual'nogo programmirovaniya v Dynamo dlya proyektirovaniya v Revit [Visual programming basics in Dynamo for design in Revit] // *Tsifrovaya transformatsiya v energetike. Digital Transformation in the Energy Sector*. Tambov, 2022. P. 103–105. (In Russ.).
7. Pertseva A. E., Khizhnyak N. S., Radayev A. E. Algoritmy proyektirovaniya konstruksiy slozhnoy konfiguratsii s ispol'zovaniyem sredstv avtomatizatsii (na primere Autodesk Revit, Autodesk Autocad i Dynamo) [Algorithm of designing complex shape construction using automation tools (by example of Autodesk Revit, Autodesk Autocad and Dynamo)] // *Transportnyye sooruzheniya. Russian Journal of Transport Engineering*. 2018. Vol. 5, no. 4. P. 4. DOI: 10.15862/04SATS418. (In Russ.).
8. Andreyev I. I., Mal'tsev V. L. Rasshirennoye ispol'zovaniye vozmozhnostey Autodesk Revit na osnove dopolneniya Dinamo [Enhanced use of Autodesk Revit features based on the Dinamo add-on] // *Informatsionnyye i graficheskiye tekhnologii v professional'noy i nauchnoy deyatel'nosti. Information and Graphic Technology in Professional and Scientific Activities*. Tyumen, 2017. P. 124–127. (In Russ.).
9. Karegin G. V., Esipov A. V. Dynamo kak sposob rasshireniya vozmozhnostey Autodesk Revit [Dynamo as a way of extending the capabilities of Autodesk Revit] // *Informatsionnyye i graficheskiye tekhnologii v professional'noy i nauchnoy deyatel'nosti. Information and Graphic Technology in Professional and Scientific Activities*. Tyumen, 2018. P. 216–218. (In Russ.).
10. Valensiya E., Rynkovskaya M. I. Rasshireniye modelirovaniya v programme Revit s pomoshch'yu Dynamo [Extending Revit Modeling with Dynamo] // *Nauchnomu*

progressu — tvorchestvo molodykh. *Young People's Creativity for Scientific Progress*. Yoshkar-Ola, 2015. P. 95–97. (In Russ.).

11. Larin V. S., Klashanov F. K. Parametricheskoye modelirovaniye v svyazke trekh apparatnykh kompleksov Archicad, Rhinoceros, Grasshopper [Parametric modeling on the example of a binding of three Archicad, Rhinoceros 3d and Grasshopper apparatus complexes] // *Studencheskiy. Studencheskiy*. 2019. No. 10 (54). P. 6–11. (In Russ.).

---

**SHUMILOV Konstantin Avgustovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Information Technologies Department, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint Petersburg.

SPIN-code: 4916-9517

AuthorID (RSCI): 826294

AuthorID (SCOPUS): 57226893414

ORCID: 0000-0003-2079-6774

Correspondence address: shkas@mail.ru

**GURYEVA Yuliana Aleksandrovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Descriptive Geometry and Engineering Graphics Department, SPbGASU, Saint Petersburg.

SPIN-code: 3262-5546

AuthorID (RSCI): 510965

ORCID: 0000-0002-5814-423X

Correspondence address: yual2017@mail.ru

#### For citations

Shumilov K. A., Guryeva Yu. A. Plastic forms of architecture in Dynamo-Revit and Grasshopper-Rhino-Archicad // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 82–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-82-90.

Received January 10, 2023.

© K. A. Shumilov, Yu. A. Guryeva

## НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАНДАРТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН

В статье приведены сведения о состоянии вопроса в области стандартизации развития и применения технологии распределенного реестра и блокчейн. Проанализировано текущее состояние в области разработки нормативных документов, в том числе документов по стандартизации. Отражен международный опыт разработки документов по стандартизации на примере международной организации по стандартизации и международного союза электросвязи, а также опыт разработки документов в национальной системе стандартизации на примере технических комитетов по стандартизации. Разработаны рекомендации к применению технологии распределенного реестра и блокчейн в национальной системе стандартизации.

**Ключевые слова:** информационные технологии, блокчейн, информационная безопасность, стандартизация, национальные стандарты в цифровых форматах, умные стандарты, SMART-стандарты.

**Введение.** Приоритетным направлением стратегического развития Российской Федерации до 2025 года является «Цифровая экономика». На данном этапе цифровизации разрабатывается методология работы с большими данными, совершенствуются цифровые инструменты постановки и системного мониторинга задач, анализа процессов, машинного обучения, технологии распределенного реестра (блокчейн), интеллектуальные сети (web 3.0) и метавселенные [1]. Подготовка нормативно-методической базы позволит создать единое цифровое информационное пространство для решения задач государственного управления и мониторинга, чтобы обеспечить внедрение современной модели интеллектуального управления. Стандартизация позволит решить задачи разработки и внедрения передовых технологий, достижения и поддержания технологического лидерства Российской Федерации в высокотехнологичных секторах экономики [2].

В рамках реализации перспективной Стратегии цифровой трансформации отраслей промышленности в целях достижения их «цифровой зрелости» и внедрения концепции «Промышленность 4.0» внедряется множество информационных технологий. При этом, в то время как разрабатываются нормативно-методическая база для таких приоритетных направлений, как искусственный интеллект (ИИ), кибер-физические системы, системы хранения данных, большие данные, криптография, интернет вещей, аддитивные технологии, математическое моделирование, для технологии блокчейн на национальном уровне пока существуют только предложения по разработке нормативных документов [3]. При этом сама технология блокчейн оценивается прозрачной и надежной [4].

Блокчейн обладает многофункциональностью, масштабируемостью, предназначена для надежного учета всего, что представляет ценность для заинтере-

сованных сторон (активов). Потенциал её применения целесообразно рассмотреть для повышения качества продукции, выполнения работ, оказания услуг и повышения конкурентоспособности продукции российского производства.

**Основная цель.** Технология блокчейн развивается с 2009 г., и по настоящий момент можно условно выделить несколько поколений блокчейн, обладающих различными характеристиками, преимуществами и недостатками, сферами целевого применения [5]. До 2016 г. технология развивалась и совершенствовалась во многом силами энтузиастов, которые в процессе разработки постепенно приходили к необходимости применения стандартизированных подходов. По мере развития и распространения блокчейн привлек внимание представителей правительственных организаций, крупных корпораций и финансового сектора.

Блокчейн — технология, организующая базу данных, которая состоит из цепочки блоков, сформированных по определенным правилам. Цепочка блоков формируется из последовательных операций, произведенных внутри блока — транзакций. Транзакции показывают движение актива, который может быть материальным (продукт) или нематериальным (интеллектуальный). Блок данных можно настроить и выбрать, какую информацию записывать: кто, что, когда, где, в каком количестве и даже состояние — например, температуру партии продуктов. Каждый блок соединен с теми, что были до и после него. Блоки формируют цепочку данных по мере совершения операций с активом или смены его владельца; регистрируют точное время и последовательность транзакций; имеют надежную взаимосвязь между собой, чтобы предотвратить изменение любого блока или внедрение блока между двумя существующими блоками. Каждый дополнительный блок усиливает верификацию предыдущего блока

и всего блокчейна. Это сводит к минимуму возможность незарегистрированного вмешательства с целью изменения записей в блокчейне, обеспечивая его ключевую характеристику — неизменность. За счёт этого создается реестр транзакций с высоким уровнем доверия. Кроме того, работа блокчейна основана на принципе децентрализации — данные находятся во всех компьютерах участников системы, которые образуют сеть, а не локально на каком-либо из компьютеров сети, имея определенный путь. Также блокчейн позволяет использовать такое средство автоматизации, как смарт-контракты. Смарт-контракты — программы, хранящиеся в блокчейне, которые запускаются при выполнении заранее определенных и запрограммированных условий. Сеть компьютеров выполняет действия, когда заранее определенные условия были выполнены и проверены. Эти действия могут включать перечисление денежных средств, регистрацию транспортного средства, отправку уведомлений, выдачу билета и т.д. В смарт-контракты может быть занесено столько условий, сколько будет необходимо для корректного решения задачи автоматизации.

Тем не менее, для того чтобы передовая технология могла быть массово внедрена, ей необходимо соответствовать целям, определяемым на законодательном уровне, и соответствовать установленным нормам и требованиям. Наиболее распространённым инструментом для выполнения этих условий является стандартизация [2]. Поэтому в целях содействия внедрению этой технологии целесообразно разработать нормативную документацию, в том числе и документы по стандартизации. Учитывая, что технология по настоящий момент находится на стадии накопления опыта, в случае для национальной системы стандартизации это могут быть технические отчеты (спецификации) либо предварительные национальные стандарты (ПНСТ).

В 2016 году международной организацией по стандартизации (ISO) был сформирован технический комитет ISO/TC 307 «Технологии блокчейна и распределенных реестров». К январю 2023 г. в комитете ISO утверждены девять документов, два из которых — международные стандарты ISO, устанавливающие терминологию и эталонную архитектуру для систем распределенных реестров, в том числе и блокчейн [6]. В разработке при этом находятся семь документов, среди которых в основном технические спецификации и отчёты. Поскольку в процессе разработки стандартов участвуют более 50 стран, в том числе и Российская Федерация, работа подкомитета ISO/TC 307 имеет перспективные обеспечивать необходимую поддержку разработки стандартов на блокчейн. В настоящее время в ISO определены направления развития стандартизации в области блокчейн и сформированы пять ключевых исследовательских групп для разработки стандартов: эталонная архитектура, таксономия и онтология, сценарии применения, безопасность и конфиденциальность, идентификация и смарт-контракты. Также в первом квартале 2023 г. в рамках собрания 17-й Исследовательской комиссии «Безопасность» готовятся к утверждению три рекомендации МСЭ-Т в области блокчейн, разработанные сектором стандартизации электросвязи международного союза электросвязи.

В 2017 г. приказом Росстандарта [7] был создан национальный технический комитет по стандартизации «Программно-аппаратные средства технологий распределённого реестра и блокчейн» (ТК 159),

представители которого также стали участниками ISO/TC 307 и приняли активное участие в подготовке проекта международного стандарта на термины и определения. В 2021 году от ТК 159 в программу национальной стандартизации (ПНС) было внесено предложение по разработке национального стандарта, устанавливающего основные понятия. В ПНС на 2022 г. от ТК 159 поступило три предложения по разработке двух национальных стандартов и одной рекомендации по стандартизации, а в ПНС на 2023 г. от ТК 159 представлены предложения по разработке двух межгосударственных стандартов. При этом участниками ТК 159 публикуются материалы, акцентирующие внимание на важности и необходимости стандартизации технологий блокчейн. «Стандартизация — важный этап на пути создания зрелого блокчейн-рынка. Стандарты упростят жизнь его участникам при реализации корпоративных систем на базе распределённого реестра, снизив затраты на исследования и разработку» [8].

Поскольку технология блокчейн использует также и механизмы криптографии, в ISO/TC 307 принимают участие также и представители национального технического комитета по стандартизации «Криптографическая защита информации» (ТК 026), эксперты которого подготовили мотивированное предложение об утверждении ПНСТ 799-2022 (введен в действие с 1 января 2023 г.) [9]. Таким образом, утверждена терминология, которая в том числе будет применяться и в блокчейн.

**Рассматриваемые проблемы.** В настоящее время идут работы по разработке и методологии применения машиночитаемых и машинопонимаемых документов, в том числе SMART-стандартов. В рамках проектного технического комитета ПТК 711 «Умные (SMART) стандарты» в октябре 2022 г. представлен проект окончательной редакции ПНСТ «Умные (SMART) стандарты. Общие положения». На 2023 г. запланирована разработка серии документов «Умные (SMART) стандарты». Разрабатывается проект окончательной редакции основополагающего национального стандарта «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации в цифровых форматах. Общие положения и классификация».

Так как работа SMART-стандартов будет построена на использовании и обмене данными, целесообразно определить возможность применения технологий блокчейн в целях обеспечения целостности данных, чтобы обеспечить защиту информации, содержащейся в стандарте от несанкционированного её изменения, особенно в случае полной автоматизации с применением машинопонимаемого содержания SMART-стандартов.

Таким образом, конечная цель применения блокчейн — обеспечение безопасности данных.

В совокупности с другими информационными технологиями, такими как ИИ, блокчейн расширяет возможные сценарии автоматизации процессов с целью повышения их эффективности [10]. Например, возможно применение обученных моделей ИИ, встроенных в смарт-контракты блокчейна с целью автоматизации мониторинга сроков актуализации действующих документов по стандартизации.

**Рекомендации к применению технологии распределенного реестра и блокчейн.** Применение технологии блокчейн может способствовать обеспечению согласованного взаимодействия участников работ по стандартизации за счет прослеживаемости цепочки всего цикла разработки документа по стан-

дартизации. К записям в блокчейн — всем ключевым сведениям о документе на этапах его разработки, от заявки в технический комитет, утверждения регулятором и до его отмены либо актуализации, возможен оперативный доступ. В части национальной системы стандартизации применение технологии блокчейн предоставит возможность автоматизированно получать рекомендации по атрибутированию документа по кодам ОКС, ОКПД2, соотнося их с кодами, закрепленными за техническими комитетами по стандартизации. Также применение технологии блокчейн техническими комитетами по стандартизации позволит им стать участниками единой сети, они смогут голосовать за подтверждение принадлежности, сохраняя при этом прослеживаемость всех принятых решений. Прозрачность и доступность записей в блокчейн позволит осуществлять более точную и подробную аналитику работ по стандартизации, используя больше данных. В том числе более точные данные позволят проводить точнее оценку добросовестности разработчиков стандартов, направляющих заявки в технические комитеты, оценку работы самих комитетов, их поощрения, определение функционала и множество других задач — управление контрактами, финансовыми транзакциями и соблюдение требований нормативных актов. Применение блокчейн в многозадачных процессах позволит усовершенствовать их, повышая качество данных для отчетов, при этом автоматизируя саму отчетность и одновременно сохраняя данные в безопасности.

Актуальной является и задача мониторинга применимости документов по стандартизации. В настоящий момент одним из источников информации о применимости стандартов служат контракты, которые публикуются в свободном доступе при проведении процедуры закупок в соответствии с законодательством и содержат в технических заданиях ссылки на стандарты. Но более полной картины о применении конкретного документа возможно добиться прослеживанием записей в блокчейн. Также может быть построена и работа о получении и сборе обратной связи в результате применения стандартов, что может быть актуально при расчетах затрат на разработку того или иного документа и полученной прибыли в результате его применения и внедрения. Имея доступ к полным и надежным данным, организации могут принимать более обоснованные решения, используя фактологический подход.

Сценарии применения технологии блокчейн находятся в непрерывном развитии, поэтому варианты их применения открывают большой простор для адаптации к тем или иным процессам.

Поскольку в ISO разработаны международные стандарты, целесообразно обратиться к их опыту. В ISO выделяют ряд преимуществ блокчейн и барьеров, препятствующих внедрению блокчейн. Внедрение технологий распределенного реестра может существенно повысить безопасность при обмене данными, повысить прозрачность, прослеживаемость, обеспечить достоверность передаваемых данных, повысить скорость совершения операций за счёт автоматизации подтверждения выполнения условий. В то же время блокчейн может быть общедоступным, консорциумом и частным, что позволит применять эту технологию в сценариях с ограничением доступа. При этом более быстрый и подталкивающий проверке обмен данными с помощью блокчейн помогает снизить уровень мошенничества

и злоупотреблений. В целом блокчейн позволяет решить такие задачи, как стандартизацию сбора, обмена данными и доступа к ним, повышение точности расчетов на основе данных, минимизацию бумажных операций за счёт обеспечения сопоставимой достоверности. В то же время стоит принять во внимание, что при внедрении этой технологии могут быть такие препятствия, как необходимость согласования применения между множеством организаций и органов, которые необходимо будет подключить к единой системе для работы по единым правилам, обеспечение кибербезопасности, появление новых бизнес-моделей, которые сложно заранее предусмотреть, необходимость совершенствовать нормативно-методическое обеспечение.

Таким образом, рекомендуется в целях актуализации работ по разработке нормативно-методического обеспечения по стандартизации целесообразно рассмотреть возможность взаимодействия технических комитетов ТК 026, ТК 159 и ПТК 711 с целью формирования системы SMART-стандартов, которые опирались бы на перспективные технологии, в том числе технологию блокчейн, а также обеспечивали бы высокий уровень безопасности данных.

**Выводы.** Внедрение технологии блокчейн в организациях требует больших затрат временного ресурса. Особую роль играют организации, которые формируют нормативно-правовую среду; им целесообразно принимать наиболее активное участие в обсуждении внедрения инновационных технологий. На основании проведенного обзора дальнейшим направлением исследований может быть оценка возможности применения рекомендаций по взаимодействию технических комитетов ТК 026, ТК 159, ПТК 711 в части актуализации работ по разработке нормативной документации в области блокчейн, определение сценариев применения системы блокчейн для внедрения в процесс разработки документов по стандартизации. Будущее технологии блокчейн в стандартизации находится в самом начале пути развития, при этом можно отметить уже проделанную работу — организован технический комитет; сформированы и утверждены темы в актуальную редакцию программы национальной стандартизации и программы межгосударственной стандартизации; ведется работа на международном уровне, что свидетельствует о потребности в стандартизации рассматриваемой технологии.

#### Библиографический список

1. Князев А. В., Черемухина Ю. Ю. Проблематика разработки стандартов по обеспечению развития метавселенных // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2022. № 4. С. 61–67. DOI: 10.46418/2619-0729\_2022\_4\_12.
2. Российская Федерация. Законы. О стандартизации в Российской Федерации: Федер. закон от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420284277> (дата обращения: 21.02.2023).
3. Утверждена программа национальной стандартизации на 2023 год // РОССТАТ. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. URL: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1//8782> (дата обращения: 14.02.2023).
4. Об утверждении методических рекомендаций для внедрения в основные общеобразовательные программы современных цифровых технологий: распоряжение Минпросвеще-

ния России от 18 мая 2020 г. № P-44. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565227683> (дата обращения: 21.02.2023).

5. Naden C. Blockchain technology set to grow further with international standards in pipeline. 2017. URL: <https://www.iso.org/news/Ref2188.htm> (дата обращения: 14.02.2023).

6. Standards by ISO/TC 307 Blockchain and distributed ledger technologies. URL: <https://www.iso.org/committee/6266604/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0> (дата обращения: 14.02.2023).

7. О создании технического комитета по стандартизации «Программно-аппаратные средства технологий распределенного реестра и блокчейн»: приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2017 г. № 2831. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/30715> (дата обращения: 21.02.2023).

8. Дружинин И. Без швов. Как решить главную проблему корпоративных блокчейн-решений // Ассоциация Финтех. URL: [https://www.fintechru.org/publications/bez-shvov-kak-reshit-glavnuyu-problemu-dlya-korporativnykh-blokcheyn-resheniy/?sphrase\\_id=5389](https://www.fintechru.org/publications/bez-shvov-kak-reshit-glavnuyu-problemu-dlya-korporativnykh-blokcheyn-resheniy/?sphrase_id=5389) (дата обращения: 21.02.2023).

9. Об утверждении предварительного национального стандарта Российской Федерации: приказ Росстандарта от 18 ноября 2022 г. № 124-пнст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300082051?section=text> (дата обращения: 21.02.2023).

10. Knyazev A., Cheremukhina J. Regulatory and Methodological Support for the Mixed Reality Technology in

Education // 2022 2nd International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education (TELE). 2022. P. 37–39. DOI: 10.1109/TELE55498.2022.9801029.

**КНЯЗЕВ Александр Васильевич**, аспирант кафедры электроники МИРЭА — Российского технологического университета (РТУ МИРЭА), г. Москва.

SPIN-код: 3652-8569

AuthorID (РИНЦ): 1092332

Адрес для переписки: [knyazev.a.v4@edu.mirea.ru](mailto:knyazev.a.v4@edu.mirea.ru)

**ЧЕРЕМУХИНА Юлия Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электроники РТУ МИРЭА, г. Москва.

SPIN-код: 8230-3472

AuthorID (РИНЦ): 847834

Адрес для переписки: [cheremukhina@mirea.ru](mailto:cheremukhina@mirea.ru)

#### Для цитирования

Князев А. В., Черемухина Ю. Ю. Нормативно-методическое обеспечение стандартизации технологии блокчейн // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 91–96. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-91-96.

Статья поступила в редакцию 09.03.2023 г.

© А. В. Князев, Ю. Ю. Черемухина

## REGULATORY AND METHODOLOGICAL SUPPORT OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES

The article provides information on the state of the issue in the field of standardization of development and application of distributed ledger technology and blockchain. The current state in the development of normative documents, including documents on standardization, is analyzed. The international experience in the development of documents on standardization is reflected on the example of the International Organization for Standardization and the International Telecommunication Union, as well as the experience of developing documents in the national standardization system on the example of technical committees for standardization. Possible scenarios for the use of distributed registry technology and blockchain in the national standardization system are considered, taking into account international experience and trends in the development, development and use of national standards in digital formats, as well as promising interaction with other information technologies that are already standardized at the international and national levels.

**Keywords:** information technologies, blockchain, information security, standardization, national standards in digital formats, smart standards, SMART-standards.

### References

1. Knyazev A. V., Cheremukhina Yu. Yu. Problematika razrabotki standartov po obespecheniyu razvitiya metaverselennykh [The problems of developing standards to ensure the development of metaverses] // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna. Seriya 4: Promyshlennyye tekhnologii. Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design Series 4. Industrial technologies*. 2022. No. 4. P. 61–67. DOI: 10.46418/2619-0729\_2022\_4\_12. (In Russ.).
2. Rossiyskaya Federatsiya. Zakony. O standartizatsii v Rossiyskoy Federatsii: feder. zakon ot 29 iyunya 2015 g. № 162-FZ [Russian Federation. Laws. On Standardization in the Russian Federation: Federal Law of 29 June 2015 No. 162-FZ]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420284277> (accessed: 21.02.2023). (In Russ.).
3. Utverzhdena programma natsional'noy standartizatsii na 2023 god [National standardisation programme for 2023 approved] // ROSSTAT. Federal'noye agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. ROSSTAT. *Federal Agency for Technical Regulation and Metrology*. URL: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1/8782> (accessed: 14.02.2023). (In Russ.).
4. Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsiy dlya vnedreniya v osnovnyye obshcheobrazovatel'nyye programmy sovremennykh tsifrovyykh tekhnologiy: rasporyazheniye Minprosveshcheniya Rossii ot 18 maya 2020 g. № R-44 [On Approval of Methodological Recommendations for Introduction of Modern Digital Technologies in Basic General Education Programmes: Order of the Ministry of Education of Russia No. R-44 of May 18, 2020]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565227683> (accessed: 21.02.2023). (In Russ.).
5. Naden C. Blockchain technology set to grow further with international standards in pipeline. 2017. URL: <https://www.iso.org/news/Ref2188.htm> (accessed: 14.02.2023). (In Engl.).
6. Standards by ISO/TC 307 Blockchain and distributed ledger technologies. URL: <https://www.iso.org/committee/6266604/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0> (accessed: 14.02.2023). (In Engl.).
7. O sozdanii tekhnicheskogo komiteta po standartizatsii «Programmno-apparatnyye sredstva tekhnologiy raspredelenogo reyestra i blokcheyn»: prikaz Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 15 dekabrya 2017 g. № 2831 [On Establishment of the Technical Committee for Standardisation «Hardware and Software for Distributed Registry and Blockchain Technologies»: Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 2831 of 15 December 2017]. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders/#/order/30715> (accessed: 21.02.2023). (In Russ.).
8. Druzhinin I. Bez shvov. Kak reshit' glavnuyu problemu korporativnykh blokcheyn-resheniy [No seams. How to solve the main problem of corporate blockchain solutions] // *Assotsiatsiya Fintekh. Fintech Association*. URL: [https://www.fintech.ru/publications/bez-shvov-kak-reshit-glavnuyu-problemu-dlya-korporativnykh-blokcheyn-resheniy/?sphrase\\_id=5389](https://www.fintech.ru/publications/bez-shvov-kak-reshit-glavnuyu-problemu-dlya-korporativnykh-blokcheyn-resheniy/?sphrase_id=5389) (accessed: 21.02.2023). (In Russ.).
9. Ob utverzhdenii predvaritel'nogo natsional'nogo standarta Rossiyskoy Federatsii: prikaz Rosstandarta ot 18 noyabrya 2022 g. № 124-pnst [On Approval of the Preliminary National Standard of the Russian Federation: Rosstandart Order No. 124-pnst of 18 November 2022]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300082051?section=text> (accessed: 21.02.2023). (In Russ.).
10. Knyazev A., Cheremukhina J. Regulatory and Methodological Support for the Mixed Reality Technology in Education // 2022 2nd International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education (TELE). 2022. P. 37–39. DOI: 10.1109/TELE55498.2022.9801029. (In Engl.).

**KNYAZEV Aleksandr Vasilyevich**, Graduate Student of Electronics Departments, MIREA — Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow.

SPIN-code: 3652-8569

AuthorID (RSCI): 1092332

Correspondence address: knyazev.a.v4@edu.mirea.ru

**CHEREMUKHINA Yuliya Yuryevna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electronics Departments, RTU MIREA, Moscow.

SPIN-code: 8230-3472

AuthorID (RSCI): 847834

Correspondence address: cheremukhina@mirea.ru

**For citations**

Knyazev A. V., Cheremukhina Yu. Yu. Regulatory and methodological support of blockchain technologies // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 91–96. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-91-96.

**Received March 09, 2023.**

© **A. V. Knyazev, Yu. Yu. Cheremukhina**

<sup>1</sup> Военный инновационный  
технополис «ЭРА»,  
г. Анапа

<sup>2</sup> Военная академия  
материально-технического обеспечения  
им. генерала армии А. В. Хрулёва,  
г. Санкт-Петербург

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассматриваются результаты исследований физических характеристик теплоаккумулирующих строительных материалов.

Современные тенденции в производстве и использовании материалов определяют необходимость разработки новых научно-методических аппаратов оценки физических характеристик энергосберегающих строительных материалов, которые позволят значительно улучшить свойства материалов, снизить их стоимость и повысить качество и надежность конструкций и изделий. В качестве такого аппарата авторами предлагается применение математической модели, статистическим описанием экспериментальных данных которой является линейная регрессия.

В качестве входных параметров системы выбраны исходные вещества для формирования микрокапсулированного теплоаккумулирующего материала, а выходными характеристиками являются зависимые переменные (удельная теплота фазового перехода, предел прочности на сжатие).

По результатам экспериментальных исследований и с помощью программы DataFit построены зависимости выходных параметров от доли составных компонентов материала. Проведена оценка адекватности математической модели  $F$ -критерием Фишера, значимость коэффициента множественной корреляции — по  $t$ -критерию Стьюдента. Определены составы материала с наилучшими физическими характеристиками.

**Ключевые слова:** теплоаккумулирующие материалы, микрокапсулы, математическая модель, физические характеристики, уравнение регрессии, критерий Фишера, критерий Стьюдента.

**Введение.** С каждым годом ужесточаются требования к энергосбережению [1]. Уменьшение потребления энергии и снижение выброса  $\text{CO}_2$  является важным моментом политики передовых стран мира. Западные страны в разных отраслях экономики активно ведут исследования по изучению вопроса энергосберегающих технологий. В России детальность сконцентрирована на оптимизации стоимости строительства в виде капитальных затрат [2]. При этом расходы на эксплуатацию зданий и сооружений не подвергались детальному анализу из-за низкой стоимости топлива и централизованного отопления объектов инфраструктуры. Вопросы безопасности и экономии материалов для строительства являются важными при проектировании зданий и сооружений.

Согласно Распоряжению Правительства РФ № 1715-р от 13.11.2009 г. «Об утверждении Энергетической стратегии России на период до 2030 года», за период реализации Стратегии планируется снижение зависимости российской экономики

от энергетического сектора за счет опережающего развития инновационных малоэнергоёмких секторов экономики и реализации технологического потенциала энергосбережения [3–6]. Достижение долгосрочных целей возможно за счет использования имеющегося в стране потенциала возобновляемых источников энергии и научно-технических разработок в этой сфере.

В зависимости от субъекта Российской Федерации разрабатываются отдельные нормы и правила строительства в области энергосбережения с учетом потенциала местной сырьевой базы [7–9].

Широкое применение имеют ограждающие конструкции с высокой тепловой эффективностью. В начале 80-х на основе анализа и оценки тепловой эффективности слоистых стеновых конструкций установлена зависимость суммарного расхода тепла от показателя сопротивления теплопередаче конструкции [10–12]. Достигнуть снижение суммарного расхода тепла возможно за счет увеличения толщины наружного ограждения, что позволит

увеличить сопротивление теплопередаче ограждения. Основываясь на практических результатах эксплуатации известных ограждающих конструкций, определено, что, вследствие недостаточной эффективности теплоизоляции, дефектов конструктивных решений, часто происходит повышенный расход тепла на отопление. Поэтому многие страны интенсивно развивают промышленное производство теплоизоляционных и теплоаккумулирующих материалов. Анализ рынка таких стран, как Швеция, Финляндия, Германия, США и другие, показал, что выпускаемые теплоизоляционные материалы имеют больший объем на душу населения, чем в России, в 5–7 раз. Также определено, что основные затраты при эксплуатации приходятся на отопление помещений. А при плохой изоляции большая часть тепловой энергии расходуется на «отопление» наружного воздуха, а не помещения. В результате исследований [13] выявлено, что устройство качественной теплоизоляции позволит сэкономить до 50 % энергии, которая расходуется на отопление.

Действующие строительные нормы показывают, что требуемое сопротивление теплопередаче увеличилось в 3–3,5 раза. А значит, существует необходимость создания эффективного теплоаккумулирующего материала с улучшенными техническими, эксплуатационными, экономическими и экологическими характеристиками. Широкое применение получили конструкции с применением теплоаккумулирующих материалов, обеспечивающих более высокие теплозащитные свойства сооружений. Однако существующие материалы имеют недостаточную стабильность, цикличность и неравномерность распределения по территории, чтобы обеспечить требуемую теплозащиту зданий и сооружений.

В связи с этим существует потребность в разработке новых научно-методических подходов по оценке физических характеристик энергосберегающих строительных материалов. Так, с помощью теории моделирования возможно рассмотрение процесса функционирования реальной системы на основе задаваемых расчетных параметров. Математическое моделирование позволит изучить физические характеристики строительных материалов и определить уровень значимости расчетных и экспериментальных данных.

**Теоретическая часть.** На этапе изучения и формирования сложных систем необходима оценка количественных и качественных зависимостей процессов, происходящих в этих системах, исследования структуры и параметров [14, 15].

На основе теории моделирования систем [16] математическое описание объекта исследований осуществляется в системе «Теплоаккумулирующий материал с микрокапсулами», которая включает параметры, описывающие процесс функционирования реальной системы. Обобщенные операторы преобразуют набор независимых внутренних параметров системы, которые представлены векторами воздействия переменных параметров во внешние выходные параметры.

В качестве входных воздействий определены: гипс  $G(x_1)$ , вода  $V(x_2)$  и микрокапсулы  $M(x_3)$ . Микрокапсулы представляют собой гранулы, материалом ядра которых является парафин, а оболочка — кремнийорганическое соединение. Переменными параметрами являются технологические  $v$ , которые оказывают влияние на формирование теплоаккумулирующего материала с микрокапсулами и включают: температура  $T(v_1)$ , давление  $P(v_2)$  и время  $t(v_3)$ .



Рис. 1. Модель формирования теплоаккумулирующего материала с микрокапсулами

Модель формирования теплоаккумулирующего материала с микрокапсулами представлена на рис. 1.

Основными выходными характеристиками системы выбраны: удельная теплота  $\lambda_{\text{ф}}^{\text{уд}}$  ( $y_1$ ) и предел прочности на сжатие  $R_{\text{сж}}$  ( $y_2$ ). Для статистического описания процесса выбрана линейная регрессия:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{u=1}^k b_u x_u + \sum_{u \neq j}^k b_{uj} x_u x_j + \sum_{u \neq j = q}^k b_{ujq} x_u x_j x_q + \dots + b_{u_1 \dots u_k} x_{u_1} x_{u_2} \dots x_{u_k}, \quad (1)$$

где  $x$  — вектор объясняющих переменных;

$b_0$  — свободный член;

$b_u, b_{uj}, b_{ujq}$  — коэффициенты, которые учитывают линейное влияние на отклик взаимодействия факторов первого, второго и т.д. порядков;

$j$  — номер наблюдения;

$k$  — общее количество наблюдений.

На основе скалярного произведения  $y$  на  $x_j$ , в зависимости от числа опытов  $N$ , определяют коэффициент уравнения регрессии  $b_j$ :

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i. \quad (2)$$

$F$ -критерием Фишера проверяют значимость функции отклика  $y$  по формуле:

$$F^{\Phi} = \frac{\bar{S}_y^2}{\bar{S}_{\text{ост}}^2}, \quad (3)$$

где  $\bar{S}_{\text{ост}}^2$  — остаточная дисперсия;

$\bar{S}_y^2$  — общая дисперсия.

Общая дисперсия рассчитывается по формуле:

$$\bar{S}_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n - 1}, \quad (4)$$

где  $y_i$  — значения параметра оптимизации в  $i$ -м опыте;

$n$  — число измерений.

Степень свободы  $f = n - 1$  определяет число независимых сравнений или число независимых измерений.

$\bar{S}_{\text{ост}}^2$  — остаточная дисперсия рассчитывается по формуле:

$$\bar{S}_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n - p - 1}, \quad (5)$$

где  $y_i$  — значения параметра оптимизации в  $i$ -м опыте;

$\hat{y}_i$  — значение регрессии в  $i$ -ом опыте;

$n$  — число повторных опытов;

$p$  — число коэффициентов регрессии исследуемой модели.

С помощью  $F$ -критерия Фишера определяют, во сколько раз уравнение регрессии предсказывает результаты опытов лучше, чем среднее значение  $y = \bar{y}$ . Среднеарифметическое значение переменной определяют по формуле:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_{i0}}{N}, \quad (6)$$

где  $N$  — количество опытов;

$y_{i0}$  — опытное значение переменной.

В случае, если  $F^{\text{ф}}$  достигает или превышает значение  $F^{\text{табл}}$  при выбранном уровне значимости, считается, что уравнение предсказывает результаты эксперимента лучше среднего.

Далее определяют коэффициент множественной корреляции  $R$  с целью изучения взаимосвязи функции отклика  $y$  и переменными  $x_i$ :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\bar{S}_{\text{ост}}^2}{\bar{S}_y^2}}. \quad (7)$$

С помощью  $t$ -критерия Стьюдента определяют значимость коэффициента множественной корреляции:

$$t_R = \frac{R}{\bar{S}_R} \geq t_{(n-p-1)}^{\text{табл}}, \quad (8)$$

где  $\bar{S}_R$  — среднеквадратическая погрешность коэффициента множественной корреляции:

$$\bar{S}_R = \frac{(1 - R^2)}{\sqrt{n - p - 1}}. \quad (9)$$

Также в качестве выходных характеристик можно рассмотреть количество теплоты, удельную теплоемкость и коэффициент теплопроводности.

Количество теплоты  $Q$ , которое получает или отдает система в процессе теплообмена, определяют по формуле:

$$Q = \lambda_{\text{ф}}^{\text{я}} \cdot m \text{ кДж}, \quad (10)$$

где  $\lambda_{\text{ф}}^{\text{я}}$  — удельная теплота плавления/кристаллизации, Дж/кг;

$m$  — масса материала, кг.

Массу материала  $m$  рассчитывают через удельный вес в зависимости от доли вещества в гипсовой штукатурке (0 %, 10 %, 50 %).

Коэффициент теплопроводности определяют в соответствии с формулой:

$$\lambda = \frac{Q_p \cdot \delta}{(T_1 - T_2)S \cdot t}, \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}, \quad (11)$$

где  $Q_p$  — количество теплоты, Дж;

$\delta$  — толщина материала, м;

$T_1, T_2$  — температура с двух сторон материала ( $T_1$  — внутренняя,  $T_2$  — внешняя), °C;

$S$  — площадь материала/объекта, м<sup>2</sup>;

$t$  — время, час.

Удельная теплоемкость материала рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{Q_p}{m_p \cdot \Delta T}, \text{ Дж/кг}\cdot\text{°C}, \quad (12)$$

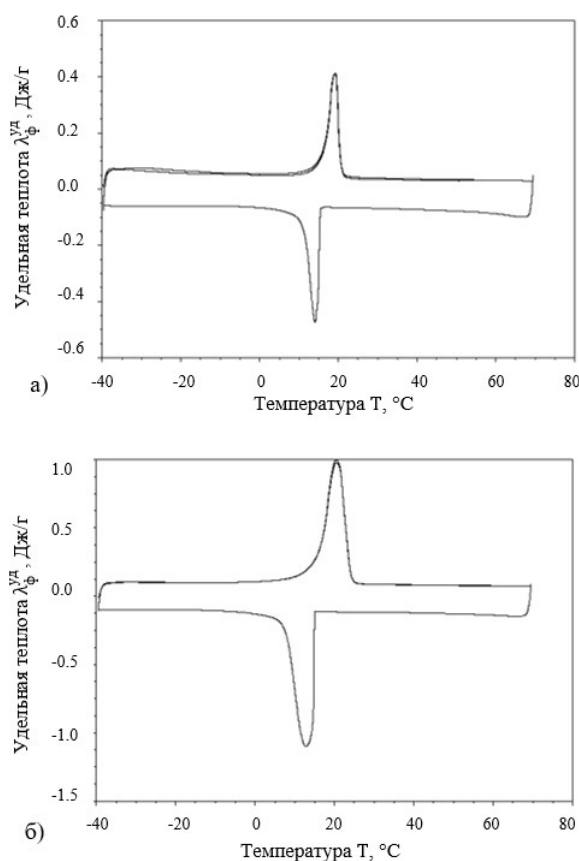


Рис. 2. Термоаналитическая кривая строительного материала:  
а) при 10 % содержании микрокапсул в общем объеме материала;  
б) при 50 % содержании микрокапсул в общем объеме материала

где  $Q_p$  — количество теплоты, кДж;

$m_p$  — масса материала, кг;

$\Delta T$  — разность конечной и начальной температуры материала, °C.

**Экспериментальная часть.** Важными методами исследования свойств веществ являются термоаналитические [17, 18], основанные на регистрации параметров исследуемой системы в условиях программированного воздействия температуры. В работе выбран метод дифференциальной сканирующей калориметрии [19].

Измерения проводились на образцах гипса с микрокапсулами с помощью дифференциального сканирующего калориметра DSQ-Q100. Полученные зависимости удельной теплоты от температуры с учетом процентного содержания микрокапсул в общем объеме материала представлены на рис. 2.

Регрессионная модель объекта с учетом натуральных обозначений факторов имеет вид:

$$\lambda_{\text{ф}}^{\text{я}} = 71,02 - 4,2G + 5,65M + 0,67GM. \quad (13)$$

Полученное соотношение показывает взаимосвязь удельной теплоты фазового перехода  $\lambda_{\text{ф}}^{\text{я}}$  с такими факторами, как содержание микрокапсул в теплоаккумулирующем материале (ТАМ) «М» и содержание гипса в ТАМ «G» микрокапсулы. На параметр оптимизации перечисленные факторы влияют пропорционально, на что указывают линейные эффекты. Наибольшее влияние оказывает доля микрокапсул, наименьшее влияние оказывают парные взаимодействия.

Далее рассчитывается дисперсия коэффициентов регрессии:

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{y\}}{nN} = \frac{0,56}{3 \cdot 9} = 0,02.$$

Среднее квадратическое отклонение с учетом каждого коэффициента регрессии:

$$S\{b_i\} = \sqrt{S^2\{b_i\}} = \sqrt{0,02} = 0,14.$$

Значимость коэффициента регрессии проверяется по соотношению  $|b_i| = t_{\text{табл}} \cdot S\{b_i\}$ . На основании таблицы  $t$ -распределения Стьюдента выбирается показатель  $t_{\text{табл}}$  с учетом уровня значимости  $\alpha=0,05$  и числа степеней свободы  $f_y$ . В связи с равномерным дублированием величина  $f_y$  определяется по формуле:

$$f_y = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 16;$$

$$t_{\text{табл}} = 2,12;$$

$$t_{\text{табл}} \cdot S\{b_i\} = 2,12 \cdot 0,14 = 0,3.$$

Условие незначимости коэффициентов регрессии:

$$|b_i| = t_{\text{табл}} \cdot S\{b_i\};$$

$$\beta_1 = |-4,2| > 0,3;$$

$$\beta_2 = |5,65| > 0,3;$$

$$\beta_{12} = |0,67| > 0,3.$$

Поскольку в результате проведенных расчетов выявлено, что все коэффициенты являются значимыми, то уравнение регрессии остается неизменным.

Рассчитывается доверительный интервал для каждого из значимых коэффициентов как

$$b_i - t_{\text{табл}} S\{b_i\} \leq \beta_i \leq b_i + t_{\text{табл}} S\{b_i\};$$

$$3,9 \leq \beta_1 \leq 4,5;$$

$$5,35 \leq \beta_2 \leq 5,95;$$

$$0,37 \leq \beta_3 \leq 0,97.$$

Адекватность математической модели проверяется  $F$ -критерием Фишера по формулам (3)-(5):

$$F = \frac{S_y^2}{S_{\text{ост}}^2} = \frac{87,9}{16,75} = 5,25.$$

На основе табличного значения  $F$ -распределения для  $\alpha=0,05$  и числа степеней свободы  $f_{y1} = n - 1 = 8$  (числитель),  $f_{y2} = n - 1 = 9 - (2 + 1) = 6$  (знаменатель),  $F_{\text{табл}} = 4,15$ . Т.о.  $F_{\text{расч}}(5,25) > F_{\text{табл}}(4,15)$ , определено, что уравнение регрессии адекватно. Чем больше значение  $F_{\text{расч}}$  превышает  $F_{\text{табл}}$ , тем эффективнее уравнение регрессии.

Коэффициент множественной корреляции  $R$ :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\bar{S}_{\text{ост}}^2}{\bar{S}_y^2}} = 0,9.$$

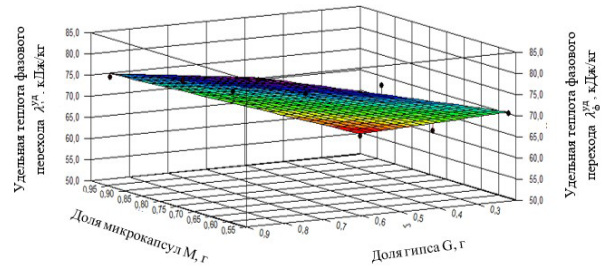


Рис. 3. Зависимость удельной теплоты фазового перехода  $\lambda_{\phi}^{ya}$  от доли микрокапсул  $M$  и доли гипса  $G$

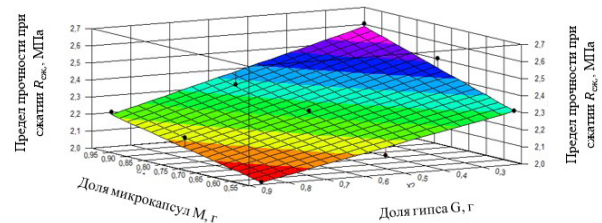


Рис. 4. Зависимость предела прочности на сжатие  $R_{сж}$  от доли микрокапсул  $M$  и доли гипса  $G$

Значимость коэффициента множественной корреляции проверяется по  $t$ -критерию Стьюдента:

$$t_R = \frac{R}{\bar{S}_R} \geq t_{(n-p-1)}^{\text{табл}}$$

$$t_R = \frac{0,9}{0,095} = 9,47 \geq 2,12.$$

Определено, что условие выполняется, следовательно, существует тесная взаимосвязь между результативным показателем и набором факторных показателей. Прогнозируемые показатели определены с точностью 90 % [20, 21].

По результатам экспериментальных исследований и с помощью программы DataFit построены зависимости выходных параметров от доли микрокапсул и гипса, которые представлены на рис. 3 и рис. 4.

По полученным графикам видно, что максимальные значения теплоты  $\lambda_{\phi}^{ya} = 83,69$  кДж/кг при достаточной прочности при сжатии  $R_{сж} = 2$  МПа достигнуто при сочетании микрокапсул в количестве 0,85 г, гипса — 0,57 г.

На рис. 5 приведено сопоставление экспериментальных с расчетными данными, полученными с использованием зависимости (13) для удельной теплоты фазового перехода.

Согласно проведенным расчетам, вероятность точности измерения достаточно высокая и равна 90 %.

В подтверждение полученных результатов были рассчитаны и другие физические характеристики, такие как:

— количество теплоты, получаемое или отдаваемое системой при теплообмене  $Q$ , рассчитывается по формуле (10);

— коэффициент теплопроводности  $\lambda$  — по формуле (11);

— удельная теплоемкость  $c$  — по формуле (12).

По результатам расчета количества теплоты  $Q_p$ , которое будет содержаться в материале, определено, что создаваемая гипсовая штукатурка с 50 %

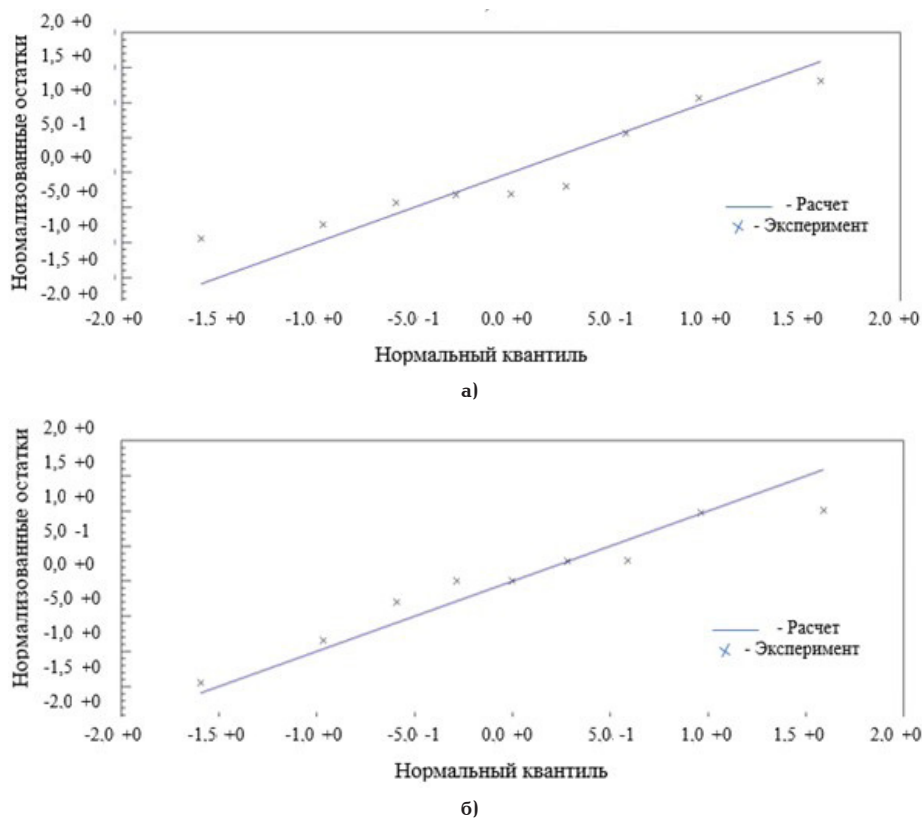


Рис. 5. График сравнения экспериментальных данных с результатами аппроксимации при  $R_2 = 0,9$ : а) для удельной теплоты; б) для прочности при сжатии

содержанием синтезированных микрокапсул способна передать тепла почти в четыре раза больше по сравнению с обычной гипсовой штукатуркой без добавления микрокапсул.

По коэффициенту теплопроводности видно, что с увеличением доли микрокапсул показатель увеличивается. Чем больше значение коэффициента теплопроводности материала, тем лучше он проводит тепло.

Относительно показателя удельной теплоемкости определено, что наилучшими являются составы гипсовой штукатурки с содержанием синтезированных микрокапсул 50 %. Чем больше удельная теплоемкость вещества, тем больше тепла необходимо затратить на его нагрев, но тем больше тепла это вещество отдает в окружающее пространство при своем охлаждении.

**Заключение.** Таким образом, разработанная сложная многофакторная система позволяет определить зависимость характеристик ТАМ от содержания входных переменных. С учетом нормативных требований [22] определено, что при 80 % содержании микрокапсул в ТАМ материал разрушается. Поэтому можно сделать вывод о том, что при выбранном сочетании компонентов (50 % микрокапсул от общей доли материала) достигается максимальный показатель удельной теплоты  $\lambda_{\text{ф}}^{\text{н}} = 83,69$  кДж/кг и при этом механическая прочность соответствует требованиям  $R_{\text{сж}} = 2$  МПа.

#### Библиографический список

1. Бодров В. И., Шевченко А. А., Ионычев Е. Г. Модель энергосберегающего производственного сельскохозяйственного здания // Известия вузов. Строительство. 2005. № 9. С. 114–116.

2. Матросов Ю. А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути её решения. Москва: НИИСФ, 2008. 496 с.

3. Мальцев А. В. Энергосберегающие ограждающие конструкции с использованием местных материалов при варьируемых параметрах теплопереноса: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2014. 169 с.

4. Об утверждении Энергетической стратегии России на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-13112009-n-1715-r/> (дата обращения: 12.02.2023).

5. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Введ. 1017–07–01. Москва: Минрегион России, 2012. 96 с.

6. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. Москва: Госстрой России, ФГУП, ЦПП, 2004. 25 с.

7. Матросов Ю. А. Сравнительный анализ территориальных норм России по энергоэффективности жилых зданий и нового постановления Германии // Энергосбережение. 2002. № 4. С. 60–63.

8. СП 23–101-2000. Проектирование тепловой защиты зданий. Москва: Госстрой России, 2001. 95 с.

9. Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоэлектроснабжению. МГСН 2.01.-99. Москва, 1999. 78 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/5fd/4294850043.pdf> (дата обращения: 10.02.2023).

10. Альшуллер Е. Н. О показателе удельной энергоёмкости в индустриальном домостроении // Бетон и железобетон. 1982. № 8. С. 27–28.

12. Альшуллер Е. Н. Эффективность применения слоистых стен в монолитном домостроении // Бетон и железобетон. 1993. № 2. С. 27–28.

13. Ушков Ф. В., Цаплев Н. Н. Энергоёмкость и тепловая эффективность наружных стен // Жилищное строительство. 1981. № 4. С. 11–12.

14. Шкарин А. В. Сухие теплоизоляционные смеси на композиционных вяжущих: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2013. 26 с.
15. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. Москва: Наука, 1988. 400 с.
16. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / пер. с англ. Ю. А. Данилова; под ред. [и с предисл.] Ю. Л. Климонтовича. Москва: Мир, 1985. 419 с.
17. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Высшая школа, 2001. 343 с.
18. Шестак Я. Теория термического анализа. Москва: Мир, 1978. 528 с.
19. Майорова А. Ф. Термоаналитические методы исследования // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 10. С. 50–54.
20. Хеммингер В., Хене Г. Калориметрия. Теория и практика / пер. с англ. О. Б. Саламатиной. Москва: Химия, 1989. 90 с.
21. Яковлева Ю. С. Результаты экспериментальных исследований энергоэффективного строительного материала для объектов военной инфраструктуры // Актуальные проблемы естественных и технических наук: сб. материалов I Междунар. науч.-практ. конф., 25 июня 2021 г. Санкт-Петербург, 2021. С. 295–302.
22. Яковлева Ю. С. Современная технология получения строительного теплоаккумулирующего материала // Тенденции развития строительства объектов гражданского и специального назначения: сб. науч. тр. по материалам II Всерос. науч.-методич. конф. 20–22 апреля 2022 г. Тюмень: Изд-во ТВВИКУ, 2022. С. 215–218.
23. ГОСТ Р 58279-2018. Смеси сухие строительные штукатурные на гипсовом вяжущем. Технические условия. Введ. 2019–07–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 16 с.

**ЯКОВЛЕВА Юлия Сергеевна**, научный сотрудник научно-исследовательского отдела экспериментальных исследований и испытаний Военного инновационного технополиса «ЭРА», г. Анапа.

SPIN-код: 3474-0490

AuthorID (РИНЦ): 657954

Адрес для переписки: usa.17@yandex.ru

**БИРЮКОВ Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой технологии, организации и экономики строительства Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 6465-0627

AuthorID (РИНЦ): 804789

Адрес для переписки: aleks\_bir@mail.ru

#### Для цитирования

Яковлева Ю. С., Бирюков А. Н. Моделирование физических характеристик теплоаккумулирующих строительных материалов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 97–104. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-97-104.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023 г.

© Ю. С. Яковлева, А. Н. Бирюков

<sup>1</sup>Military Innovative Technopolis «ERA»,  
Anapa, Russia

<sup>2</sup>Military Academy  
of Logistics named after General  
of Army A. V. Khrulev,  
Saint Petersburg, Russia

## MODELING OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF HEAT-ACCUMULATING BUILDING MATERIALS

The article discusses the results of studies of the physical characteristics of heat-accumulating building materials.

Modern trends in the production and use of materials determine the need to develop new scientific and methodological devices for assessing the physical characteristics of energy-saving building materials, which will significantly improve the properties of materials, reduce their cost and improve the quality and reliability of structures and products. As such a device, the authors propose the use of a mathematical model, the statistical description of experimental data of which is linear regression. The initial substances for the formation of a microcapsulated heat-accumulating material are selected as input parameters of the system, and the output characteristics are dependent variables (specific heat of the phase transition, compressive strength). Based on the results of experimental studies and using the DataFit program.

**Keywords:** heat storage materials, microcapsules, mathematical model, physical characteristics, regression equation, Fisher criterion, Student criterion.

### References

1. Bodrov V. I., Shevchenko A. A., Ionychev E. G. Model' energosberegayushchego proizvodstvennogo sel'skokhozyaystvennogo zdaniya [Model of an energy-efficient production agricultural building] // *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo. Izvestia of Higher Education Institutions. Construction*. 2005. No. 9. P. 114–116. (In Russ.).
2. Matrosov Yu. A. Energoberezheniye v zdaniyakh. Problema i puti ee resheniya [Energy saving in buildings. The problem and how to solve it]. Moscow, 2008. 496 p. (In Russ.).
3. Mal'tsev A. V. Energoberegayushchiye ograzhdayushchiye konstruktsii s ispol'zovaniyem mestnykh materialov pri var'iruyemykh parametrah teplomassoperenosa [Energy-saving building envelopes using local materials with varying heat and mass transfer parameters]. Penza, 2014. 169 p. (In Russ.).
4. Ob utverzhdenii Energeticheskoy strategii Rossii na period do 2030 goda: rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 13 noyabrya 2009 g. № 1715-r. [On Approval of Russia's Energy Strategy to 2030: Russian Government Order No. 1715-r of 13 November 2009]. URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstv-rf-ot-13112009-n-1715-r/> (accessed: 12.02.2023). (In Russ.).
5. SP 50.13330.2012. Svod pravil. Teplovaya zashchita zdaniy [SP 50.13330.2012. The course of rules. Thermal performance of the buildings]. Moscow, 2012. 96 p. (In Russ.).
6. SNiP 23-02-2003. Teplovaya zashchita zdaniy [SNiP 23-02-2003. Thermal performance of the buildings]. Moscow, 2004. 25 p. (In Russ.).
7. Matrosov Yu. A. Sravnitel'nyy analiz territorial'nykh norm Rossii po energoeffektivnosti zhilykh zdaniy i novogo postanovleniya Germanii [Comparative analysis of Russian

territorial standards for energy efficiency in residential buildings and the new German regulation] // *Energoberezheniye. Energy Efficiency*. 2002. No. 4. P. 60–63. (In Russ.).

8. SP 23–101-2000. Proyektirovaniye teplovoy zashchity zdaniy [SP 50.13330.2012. Thermal performance design of buildings]. Moscow, 2001. 95 p. (In Russ.).

9. Energoberezheniye v zdaniyakh. Normativy po teplozashchite i teplovodoelektrosnabzheniyu. MGSN 2.01.-99 [Energy-efficient in buildings. Standards for thermal protection and thermo-electricity. MGSN 2.01.-99.]. Moscow, 1999. 78 p. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/5fd/4294850043.pdf> (accessed: 10.02.2023). (In Russ.).

10. Al'tshuller E. N. O pokazatele udel'noy energoyemkosti v industrial'nom domostroyenii [On the indicator of specific energy intensity in industrial house building] // *Beton i zhelezobeton. Concrete and Reinforced Concrete*. 1982. No. 8. P. 27–28. (In Russ.).

11. Al'tshuller E. N. Effektivnost' primeneniya sloistykh sten v monolitnom domostroyenii Effectiveness of the use of laminated walls in monolithic construction // *Beton i zhelezobeton. Concrete and Reinforced Concrete*. 1993. No. 2. P. 27–28. (In Russ.).

12. Ushkov F. V., Tsaplev N. N. Energoyemkost' i teplovaya effektivnost' naruzhnykh sten [Energy intensity and thermal efficiency of exterior walls] // *Zhilishchnoye stroitel'stvo. Housing Construction*. 1981. No. 4. P. 11–12. (In Russ.).

13. Shkarin A. V. Sukhiye teploizolyatsionnyye smesi na kompozitsionnykh vyazhushchikh [Dry heat insulating mixtures based on composite binders]. Belgorod, 2013. 26 p. (In Russ.).

14. Buslenko N. P. Modelirovaniye slozhnykh sistem [Modelling of complex systems]. Moscow, 1988. 400 p. (In Russ.).

15. Haken H. Sinergetika. Ierarkhiya neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh [Advanced Synergetics] / trans. from Engl. Yu. A. Danilova; ed. by Yu. L. Klimontovicha. Moscow, 1985. 419 p. (In Russ.).

16. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. Modelirovaniye system [Systems Modeling]. 3rd ed. Moscow, 2001. 343 p. (In Russ.).

17. Shestak Ya. Teoriya termicheskogo analiza [Theory of thermal analysis]. Moscow, 1978. 528 p. (In Russ.).

18. Mayorova A. F. Termoanaliticheskiye metody issledovaniya [Thermoanalytical research methods] // Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal. *Soros Education Journal*. 1998. No. 10. P. 50–54. (In Russ.).

19. Hemminger W., Hohne G. Kalorimetriya. Teoriya i praktika [Calorimetry: Fundamentals and practice] / ed. by O. B. Salamatinoy. Moscow, 1989. 90 p. (In Russ.).

20. Yakovleva Yu. S. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy energoeffektivnogo stroitel'nogo materiala dlya ob'yektov voyennoy infrastruktury [Experimental results on an energy-efficient building material for military infrastructure] // Aktual'nyye problemy yestestvennykh i tekhnicheskikh nauk. *Current Issues in Natural and Technical Sciences*. St. Petersburg, 2021. P. 295–302. (In Russ.).

21. Yakovleva Yu. S. Sovremennaya tekhnologiya polucheniya stroitel'nogo teploakkumuliruyushchego materiala [State-of-the-art technology for building heat storage material] // Tendentsii razvitiya stroitel'stva ob'yektov grazhdanskogo i spetsial'nogo naznacheniya. *Trends in Civil and Special Construction Projects*. Tyumen, 2022. P. 215–218. (In Russ.).

22. GOST P 58279-2018. Smesi sukhiye stroitel'nyye shtukaturnyye na gipsovom vyazhushchem. Tekhnicheskiye

usloviya [Dry building levelling plaster mixes based on gypsum binder. Specifications]. Moscow, 2019. 16 p. (In Russ.).

**YAKOVLEVA Yuliya Sergeevna**, Researcher of Research Department of Experimental Research and Testing, Military Innovative Technopolis «ERA», Anapa.

SPIN-code: 3474-0490

AuthorID (RSCI): 657954

Correspondence address: usa.17@yandex.ru

**BIRYUKOV Aleksandr Nikolayevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Technology, Organization and Economics of Construction Department, Military Institute (Engineering and Technical) Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev, Saint Petersburg.

SPIN-code: 6465-0627

AuthorID (RSCI): 804789

Correspondence address: aleks\_bir@mail.ru

#### For citations

Yakovleva Yu. S., Biryukov A. N. Modeling of physical characteristics of heat-accumulating building materials // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 97–104. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-97-104.

Received March 06, 2023.

© Yu. S. Yakovleva, A. N. Biryukov

<sup>1</sup> Институт проблем управления  
им. В. А. Трапезникова  
Российской академии наук,  
г. Москва

<sup>2</sup> АО «НПО Лавочкина»,  
Московская область,  
г. Химки

## ФУНКЦИОНАЛЬНО-ВОКСЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ИТЕРАЦИОННОЙ КОМПОЗИЦИИ СЛОЖНЫХ КОНТУРОВ

Аналитическое представление наиболее точно передает геометрию моделируемых объектов, однако его применение сопряжено с рядом сложностей. В частности, R-функциональное моделирование предъявляет высокие требования к квалификации исследователя и может потребовать значительное время для построения моделей в силу рекурсивной вложенности вычислений. Рассмотрено применение особенностей функционально-воксельных моделей для упрощения R-функционального моделирования сложных контуров. В качестве основного инструмента итерационного моделирования сложных контуров, в том числе параметрических кривых, предложена Функция Локального Обнуления. Описан способ определения отрицательной области ФЛОБ-конструированных моделей контуров для дальнейшего построения сложнопредикатных функций посредством R-функциональных операций.

**Ключевые слова:** функционально-воксельное моделирование, ФЛОБ, ФЛОБ-конструирование, функционально-воксельная арифметика, R-функциональное моделирование, сложная предикатная функция, моделирование сложных контуров, моделирование параметрических функций.

**Введение.** Аналитические модели являются наиболее точным способом представления геометрической информации. В свою очередь, R-функциональное моделирование [1], позволяющее применять теоретико-множественные операции к областям аналитических функций, предоставляет возможности для аналитического моделирования геометрических объектов сложной формы как в двумерном, так и в трехмерном пространстве для решения задач с геометрической постановкой [2, 3].

Однако применение R-функциональных операций сопряжено с рядом трудностей. R-функциональное описание геометрически сложных объектов требует соответствующей математической подготовки применяющего его специалиста, а особенности применения R-функциональных операций требуют значительных временных ресурсов для построения сложно-предикатных функций. Таким образом, затрудняется применение R-функционального моделирования в задачах, требующих быстрого и высокоточного решения даже в случае моделирования плоских контуров.

Метод функционально-воксельного моделирования [4] является способом представления аналитических функций на компьютере, нашедший свое применение во многих областях [5–8]. При этом аналитическая функция представляется в виде области локальных функций, на которой выделены внутренняя и внешняя области функции. Аналити-

ческая функция любой сложности сводится к линейной локальной функции:

$$z = -\frac{n_1}{n_3}x - \frac{n_2}{n_3}y - \frac{n_4}{n_3}, \quad (1)$$

где  $n_1, n_2, n_3, n_4$  — локальные геометрические характеристики функции, определяемые в процессе моделирования и хранимые в памяти компьютера в виде графических образов.

Такое представление позволяет применять к функционально-воксельным моделям R-функциональные операции, создавая компьютерное представление R-функциональных моделей. Особенности применения функционально-воксельных моделей позволяют решить некоторые проблемы, возникающие при R-функциональном моделировании.

**Необходимость переаппроксимации области функции.** Одной из проблем R-функционального моделирования является необходимость переаппроксимации области функции после выполнения каждой R-функциональной операции, что требует переразбиения области моделируемой функции. Современные вычислительные мощности таковы, что данная проблема практически незаметна при моделировании несложных предикатных функций на достаточно малой рассматриваемой области. Однако для построения высокоточных геометрических

моделей необходимо увеличение графических образов, что закономерно увеличивает время, требуемое для получения решения. Более того, время, необходимое на получение решения, нелинейно возрастает с увеличением количества применяемых функций и  $R$ -функциональных операций вследствие рекурсивной вложенности  $R$ -функциональных вычислений, о которой будет сказано ниже. Таким образом, даже исключив необходимость переаппроксимации на каждом этапе вычислений, возможно сократить время работы алгоритма моделирования сложных объектов.

Применение функционально-воксельных моделей позволяет реализовать  $R$ -функциональные процедуры посредством функционально-воксельной арифметики [4, с. 39–52]. При этом операции  $R$ -функционального пересечения и объединения заменяются последовательным применением функционально-воксельного сложения, вычитания, возведения в квадрат, выделения корня, умножения на число и взятия модуля, требующих для расчета локальные геометрические характеристики в каждой точке области функции, доступные в любой момент времени в функционально-воксельной модели.

Например, в случае вычисления сложной предикатной функции, включающей в себя применение двух  $R$ -функциональных операций по отношению к трем аналитическим функциям, потребует помимо аппроксимации области каждой из исходных функций также переаппроксимацию области каждого из промежуточных результатов. В случае  $R$ -воксельного подхода аппроксимация области необходима только для исходных функций. С увеличением количества применяемых  $R$ -функциональных операций и используемых аналитических функций разрыв в количестве проводимых операций аппроксимации закономерно растет.

**Рекурсивная вложенность  $R$ -функциональных вычислений.** Другой проблемой  $R$ -функциональных вычислений является их рекурсивная вложенность, увеличивающая объем необходимых для нахождения решения вычислений.

Одной из причин рекурсивности вычислений является невозможность сохранения промежуточных результатов, что в случае многократного применения одной и той же функции требует повторного ее моделирования (включающего в себя аппроксимацию области). Например, возьмем некоторую сложную предикатную функцию:

$$w = (w_1 \vee w_2) \wedge (w_2 \vee w_3) \wedge w_3. \quad (2)$$

Для расчета каждой точки области результирующей функции  $w$  необходимо разбивать эту функцию на ее составляющие. Для расчета функции  $w$  необходим расчет  $w_3$ ,  $(w_1 \vee w_2)$  и  $(w_2 \vee w_3)$ , для расчета  $(w_1 \vee w_2)$  необходимо рассчитать  $w_1$  и  $w_2$ , а для расчета  $(w_2 \vee w_3)$  вычислить  $w_2$  и  $w_3$ . Вследствие отсутствия возможности сохранения результатов уже проведенных расчетов функции  $w_2$  и  $w_3$  будут рассчитываться дважды. Помимо этого, на каждом этапе вычислений потребуется перерасчитывать промежуточные результаты.

С увеличением количества производимых  $R$ -функциональных операций и участвующих в вычислениях функций происходит разрастание дерева вычислений сложной предикатной функции, пример которого представлен на рис. 1. Возрастет время производимых вычислений, что особенно существенно при построении геометрически слож-

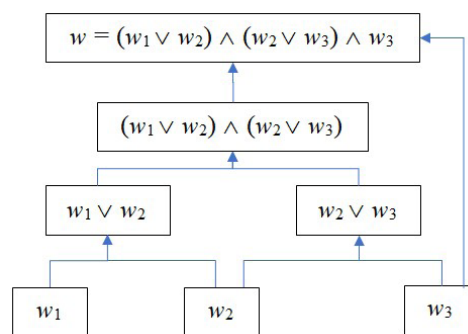


Рис. 1. Дерево  $R$ -функциональных вычислений сложной предикатной функции

$$(\dots ((f_1(x_m) \wedge f_2(x_m)) \wedge f_3(x_m)) \wedge f_4(x_m)) \dots \wedge f_n(x_m))$$

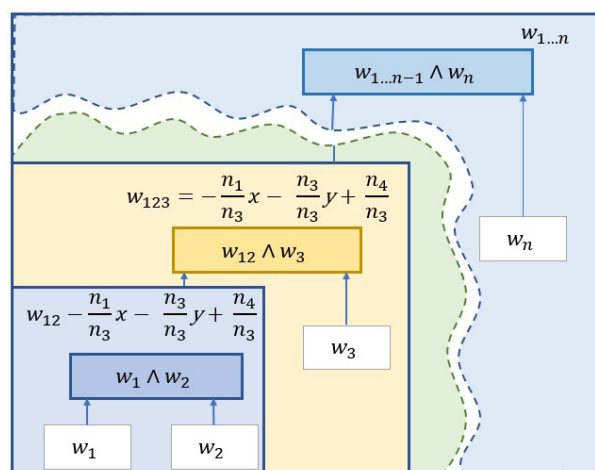


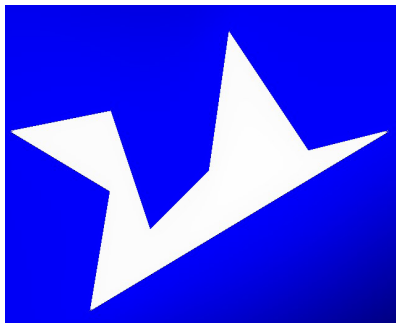
Рис. 2. Итерационная схема конструирования сложной предикатной функции

ных объектов, например, плоских контуров, включающих в себя множество составных элементов.

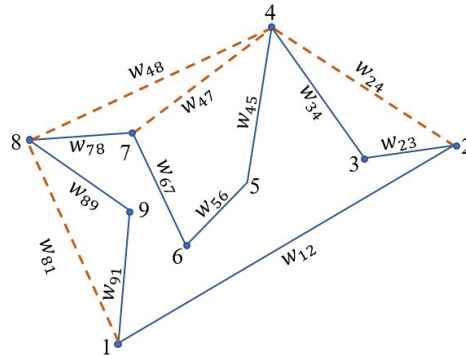
Необходимость переаппроксимации области моделируемой функции после выполнения каждого шага вычислений в совокупности с повторным расчетом моделей, повторяющихся в сложном предикатном выражении функций, увеличивает объем необходимых для нахождения решения вычислений. Применение функционально-воксельных моделей позволит обойти применение рекурсивных расчетов. Каждая аналитическая функция сохраняется в функционально-воксельной модели посредством графических образов. Также возможно сохранение каждой промежуточной области, образованной комбинацией исходных. При этом отпадает необходимость в проведении рекурсивно вложенных вычислений, заменяемых итерационной композицией искомой функции из исходных, что наглядно представлено на рис. 2.

Другой причиной рекурсивности вычислений является особенность построения моделей областей невыпуклых контуров.  $R$ -функциональное построение такого контура требует его сведения к выпуклому контуру и постепенному пошаговому удалению лишних областей. Исключать при этом возможно только выпуклые области, что также требует разбиения удаляемых невыпуклых подконтуров на выпуклые фрагменты.

Например,  $R$ -функциональное описание представленного на рис. 3а контура из восьми отрезков

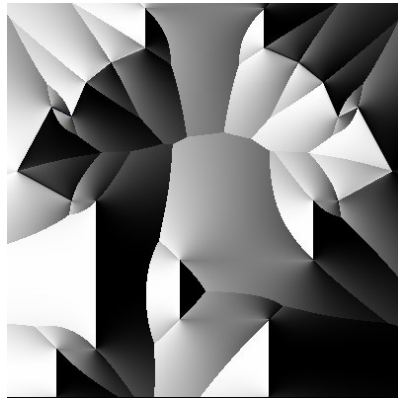


а)

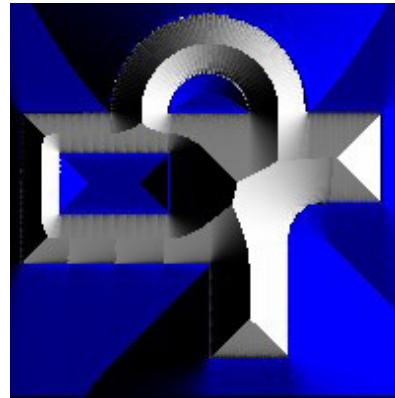


б)

Рис. 3. Изображение и схема конструирования невыпуклого контура: а) пример невыпуклого контура; б) схема R-функционального конструирования невыпуклого контура



а)



б)

Рис. 4. Примеры ФЛОБ-конструированных моделей сложных контуров: а) модель ФЛОБ-конструированного невыпуклого контура; б) модель ФЛОБ-конструированного невыпуклого контура с внутренними отрицательными областями

осуществляется по представленной на рис. 3б схеме и включает в себя девять R-функциональных операций над десятью функциями:

$$w = w_{12} \wedge ((w_{47} \vee w_{78}) \wedge (w_{45} \vee w_{56} \vee w_{67})) \wedge (w_{23} \vee w_{34}) \wedge (w_{89} \vee w_{91}). \quad (3)$$

Из выпуклого контура 1248 удаляют контуры 234, 198. Чтобы удалить контур 45678, его необходимо разбить на выпуклые, а значит, сначала удалить 874, а затем 4567.

По мере усложнения моделируемого контура дерево рекурсивных вычислений становится разветвленное и включает в себя все больше уровней вложенности. Выполнение подобных рекурсивных вычислений для каждой точки области может занимать продолжительное время.

Обойти данное ограничение позволяет функция локального обнуления (ФЛОБ) [9], являющаяся многомерным инструментом функционально-воксельного моделирования. В двумерном случае ФЛОБ представляет собой нулевой отрезок на положительной области, задаваемый аналитической функцией:

$$FLOB_2 = \sqrt{(Y - Y_1)^2 + (X - X_1)^2} + \sqrt{(Y - Y_2)^2 + (X - X_2)^2} - \sqrt{(Y - Y_2)^2 + (X_1 - X_2)^2}, \quad (4)$$

где  $(X; Y)$  — текущая точка области,  $(X_1; Y_1)$  и  $(X_2; Y_2)$  — концы моделируемого отрезка.

Это позволяет посредством R-функционального пересечения последовательности функционально-воксельных моделей таких отрезков конструировать искомый контур на положительной области функции. Построение модели ФЛОБа не зависит от его ориентации на области и порядка указания границ отрезка, в связи с чем нет необходимости в каких-либо дополнительных преобразованиях и сложных алгоритмах конструирования невыпуклых контуров. Время, необходимое на построение контура посредством ФЛОБ-конструирования, линейно зависит от количества отрезков, составляющих контур и напрямую от размеров используемого графического образа.

#### ФЛОБ-конструирование плоских контуров.

Все вышеприведенные принципы позволяют достичь повышения скорости получения результата моделирования. Например, для моделирования уже рассмотренного контура, представленного на рис. 3а, при размерах графического образа 800×800 требуется 17 минут 29 секунд при классическом R-функциональном вычислении против 1 минуты 51 секунды при ФЛОБ-конструировании с применением предложенных принципов.

Построение контуров, имеющих более сложную геометрию, также не составит труда. На рис. 4а представлен пример ФЛОБ-конструированной

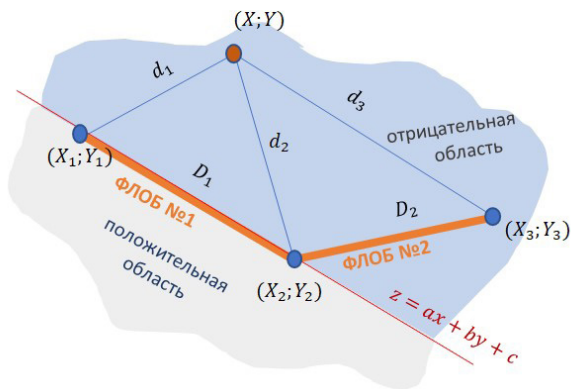


Рис. 5. Схема определения знака точки области ФЛОБ-конструированной параметрической кривой

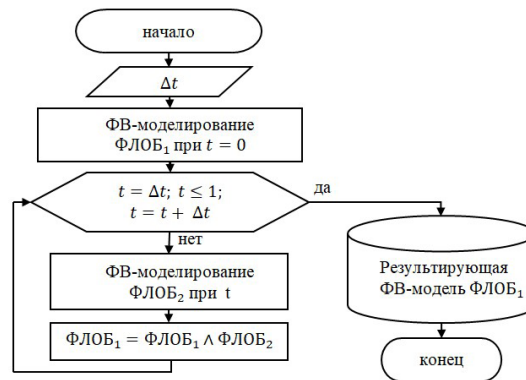


Рис. 6. Алгоритм итерационного ФЛОБ-конструирования параметрической кривой

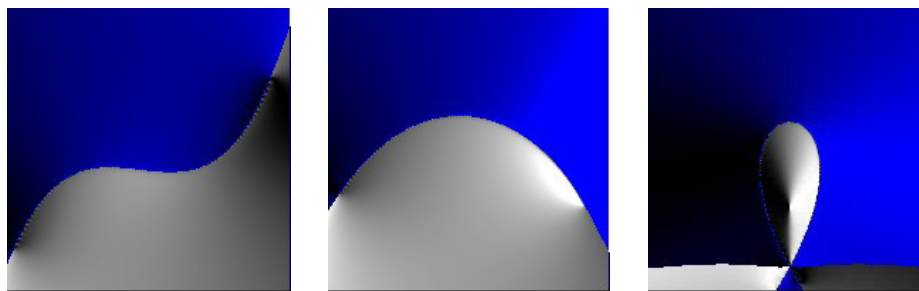


Рис. 7. Примеры моделей ФЛОБ-конструированных параметрических кривых с определенными отрицательными областями

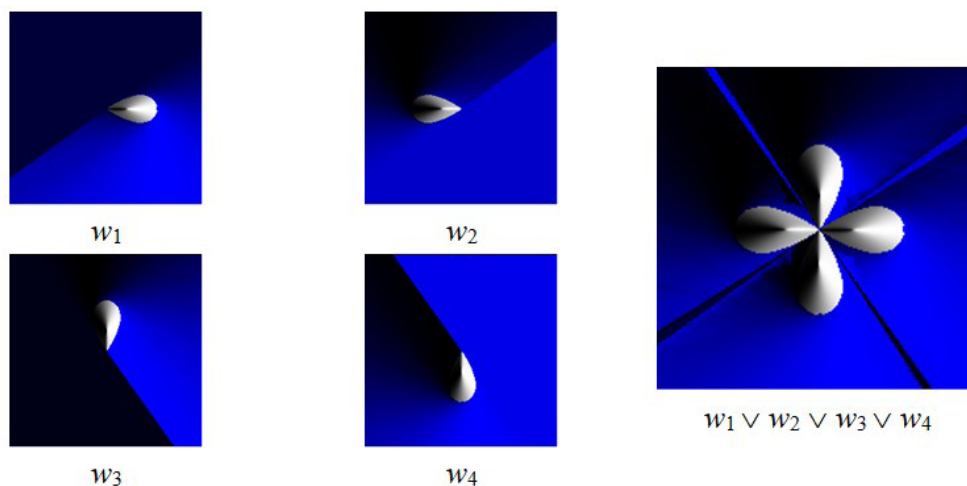


Рис. 8. Пример модели сложной предикатной функции, состоящей из ФЛОБ-конструированных моделей параметрических кривых

модели невыпуклого контура, включающего в себя как отрезки прямой, так и дуги окружности. Также на ФЛОБ-конструированных моделях возможно определение отрицательной области, что позволит посредством применения  $R$ -функциональных операций к моделям уже построенных контуров конструировать области более сложной формы. Например, контур, представленный на рис. 4б, содержащий внутренние отрицательные области.

На данный момент задача автоматизированного определения отрицательной области для ФЛОБ-конструированных контуров решена в случае, когда контуры состоят из множества одинаковых по длине отрезков. Принадлежность каждой точки модели отрицательной области определяется нахождением данной точки в положительной (внутренней) или отрицательной (внешней) области прямой, прохо-

дящей через ближайший к рассматриваемой точке ФЛОБ. На рис. 5 схематично показано, что рассматриваемая точка  $(X; Y)$  располагается ближе к ФЛОБ № 1 (ограниченного точками  $(X_1; Y_1)$  и  $(X_2; Y_2)$ ), чем к ФЛОБ № 2 (ограниченного точками  $(X_2; Y_2)$  и  $(X_3; Y_3)$ ) и находится в отрицательной области, проходящей через него прямой  $z = ax + by + c$ , то есть относится к отрицательной области результирующего контура. Близость каждого ФЛОБа к рассматриваемой точке определяется значением его алгебраической функции  $FLOB_2$  — чем ближе точка находится к ФЛОБу, тем меньше значение этой функции.

Данный принцип успешно применен для построения отрицательных областей ФЛОБ-конструированных параметрических кривых. Параметрические кривые разбиваются на последо-

вательность отрезков за счет шага дискретизации параметра  $t$ . Применение выше предложенных принципов позволяет итерационно конструировать параметрические кривые с достаточно малым для построения гладкой поверхности значением параметра по алгоритму, представленному на рис. 6. Благодаря этому появляется возможность применять функционально-воксельный метод в областях, требующих применения параметрических функций [10–13] и расширяются его возможности в построении сложных контуров для решения задач с геометрической постановкой [14, 15].

Примеры ФЛОБ-конструированных параметрических кривых с определенной отрицательной областью представлены на рис. 7. На рис. 8 приведен пример построения контура, задаваемого сложной предикатной функцией над областями ФЛОБ-конструированных параметрических кривых с определенной отрицательной областью.

**Заключение.** Приведенные выше принципы позволяют ускорить построение геометрических моделей сложных предикатных функций, что открывает возможности для применения  $R$ -функционального моделирования в задачах, требующих быстрого расчета точных геометрических моделей. Решается проблема рекурсивной вложенности алгоритма конструирования сложных контуров посредством  $R$ -функциональных операций, что позволяет создавать точные функционально-воксельные модели параметрических кривых. Определение отрицательной области ФЛОБ-конструированных функций расширяет возможности создания функционально-воксельных моделей сложных контуров для дальнейшего применения в сложно-предикатных функциях.

#### Библиографический список

1. Рвачев В. А. Теория  $R$ -функций и некоторые ее приложения. Киев: Наукова думка, 1982. 552 с.
2. Лисин Д. А., Максименко-Шейко К. В., Толлок А. В., Шейко Т. И.  $R$ -функции в компьютерном моделировании дизайна 3D-поверхности автомобиля // Прикладная информатика. 2011. № 6 (36). С. 78–85.
3. 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. 45–52.
4. Толлок А. В. Локальная компьютерная геометрия. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2022. 147 с.
5. Batuev E. R., Tolok A. V., Tolok N. B. Voxel Modeling of the Control of Prototype Manufacturing with Additive Technologies // Automation and Remote Control. 2021. Vol. 82, no. 3. P. 506–515. DOI: 10.1134/S0005117921030103.
6. Пушкарев С. А. Геометрическое моделирование локальных характеристик механического напряжения: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2021. 108 с.
7. Петухов П. А., Толлок А. В. Исследование метода функционально-воксельного моделирования на основе средств потенциальных полей к задачам поиска пути // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: сб. тр. конф. Москва, 2019. С. 3173–3178. DOI: 10.25728/vspru.2019.3173.
8. Локтев М. А., Додонов С. В., Петухов П. А., Толлок А. В. Интерактивная система создания и компоновки функциональ-

но-воксельных моделей для решения задачи поиска пути градиентным методом // Вестник МГТУ Станкин. 2016. № 3 (38). С. 66–69.

9. Tolok A. V., Tolok N. B. Local R-Functional Modelling (LRFM) // Proc. of the 31st Intern. conf. on Computer Graphics and Vision, Sep. 27–30, 2021. Nizhny Novgorod, 2021. Vol. 3027. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3027/paper64.pdf> (дата обращения: 15.12.2022).

10. Е Вин Тун, Маркин Л. В. Построение рецепторных геометрических моделей объектов сложных технических форм // Геометрия и графика. 2019. Т. 7, № 4. С. 44–56. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-44-56.

11. Зиатдинов Р., Кенджиро Т. М. Кривые высокого качества и их применение в геометрическом моделировании и эстетическом дизайне // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2012): тр. 12-й Междунар. конф., 16–18 октября 2012 г. Москва: Аналитик, 2012. С. 145–147.

12. Короткий В. А. Кубические кривые в инженерной геометрии // Геометрия и графика. 2020. Т. 8, № 3. С. 3–24. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-3-24.

13. Рязанов С. А., Решетников М. К. Аналитические зависимости кинематического формообразования начальных поверхностей элементов червячной передачи // Геометрия и графика. 2019. Т. 7, № 2. С. 65–75. DOI: 10.12737/article\_5d2c2dda42fda7.79858292.

14. Сычева А. А., Плаксин А. М. Функционально-воксельное моделирование траектории движения инструмента при фрезеровании карманной области // ГрафиКон 2022: тр. 32-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению, 19–22 сентября 2022 г. Рязань, 2022. С. 896–902.

15. Shutova K. Yu., Sycheva A. A. Using a Functional Voxel Model to Simulate Swarm Motion of a Multi-agent System in a Confined Space // Technologies for Smart Cities. 2023. P. 21–30. DOI: 10.1007/978-3-031-05516-4\_2. ISBN 978-3-031-05515-7.

**СЫЧЕВА Анастасия Антоновна**, младший научный сотрудник лаборатории № 18 Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва. SPIN-код: 3256-3877

AuthorID (РИНЦ): 1103737

ORCID: 0000-0003-3230-4271

AuthorID (SCOPUS): 57220899747

ResearcherID: AAI-3664-2021

Адрес для переписки: a.a.sycheva@mail.ru

**ПЛАКСИН Александр Михайлович**, начальник бюро АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

SPIN-код: 6761-4183

AuthorID (РИНЦ): 881905

ORCID: 0000-0001-9390-8322

AuthorID (SCOPUS): 57218766684

ResearcherID: ADG-6336-2022

Адрес для переписки: a.m.plaksin@gmail.com

#### Для цитирования

Сычева А. А., Плаксин А. М. Функционально-воксельный алгоритм итерационной композиции сложных контуров // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 105–111. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-105-111.

Статья поступила в редакцию 15.01.2023 г.

© А. А. Сычева, А. М. Плаксин

<sup>1</sup>V. A. Trapeznikov Institute  
of Control Sciences  
of Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lavochkin Association,  
Moscow Region,  
Khimki, Russia

## THE FUNCTIONAL VOXEL ALGORITHM FOR ITERATIVE COMPOSITION OF COMPLEX CONTOURS

The analytical representation most accurately describes the geometry of the simulated objects. However, its application is associated with a number of difficulties. In particular, R-functional modeling imposes high requirements to the qualification of the researcher and may require considerable time for modeling due to recursive nesting of calculations. The application of features of functional-voxel models to simplify R-functional modeling of complex contours is considered. The Function of Local Zeroing is proposed as the main tool for iterative modeling of complex contours, including parametric curves. The method of determining the negative area of FLOZ-constructed contour models for further construction of predicate complex functions by means of R-functional operations is described.

**Keywords:** functional-voxel modeling, FLOZ, FLOZ-construction, functional-voxel arithmetic, R-functional modeling, complex predicate function, complex contour modeling, parametric functions modelling.

### References

1. Rvachev V. L. Teoriya R-funktsiy i nekotoryye eye prilozheniya [R-function theory and some of its applications]. Kiev, 1982. 552 p. (In Russ.).
2. Lisin D. A., Maksimenko-Sheyko K. V., Tolok A. V., Sheyko T. I. R-funktsii v komp'yuternom modelirovanii dizayna 3D-poverkhnosti avtomobilya [R-functions in computer modeling of 3D CAR surface design] // // Prikladnaya informatika. *Applied Informatics*. 2011. No. 6 (36). P. 78–85. (In Russ.).
3. Litvinova Yu. S., Maksimenko-Sheyko K. V., Sheyko T. I. Matematicheskoye i komp'yuternoye modelirovaniye stroitel'nykh konstruktsey na osnove R-funktsiy [Mathematical and computer modelling of building structures based on R-functions] // Problemy mashinostroyeniya. *Problems of Mechanical Engineering*. 2014. Vol. 17, no. 3. P. 45–52. (In Russ.).
4. Tolok A. V. Lokal'naya komp'yuternaya geometriya [Local computer geometry]. Moscow, 2022. 147 p. (In Russ.).
5. Batuev E. R., Tolok A. V., Tolok N. B. Voxel Modeling of the Control of Prototype Manufacturing with Additive Technologies // Automation and Remote Control. 2021. Vol. 82, no. 3. P. 506–515. DOI: 10.1134/S0005117921030103. (In Engl.).
6. Pushkarev S. A. Geometricheskoye modelirovaniye lokal'nykh kharakteristik mekhanicheskogo napryazheniya [Geometric modelling of local mechanical stress characteristics]. Nizhny Novgorod, 2021. 108 p. (In Russ.).
7. Petukhov P. A., Tolok A. V. Issledovaniye metoda funktsional'no-voksel'nogo modelirovaniya na osnove sredstv potentsial'nykh poley k zadacham poiska puti [Investigation of the method of functional-voxel modelling based on potential field means to pathfinding problems] // XIII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU–2019. *XIII All-Russian Conference on Management Problems VSPU–2019*. Moscow, 2019. P. 3173–3178. DOI: 10.25728/vspu.2019.3173. (In Russ.).
8. Loktev M. A., Dodonov S. V., Petukhov P. A., Tolok A. V. Interaktivnaya sistema sozdaniya i komponovki funktsional'no-voksel'nykh modeley dlya resheniya zadachi poiska puti gradiyentnym metodom [The interactive system for creating and linking functional-voxel models for solving the problem of finding a path using the gradient method] // Vestnik MGTU Stankin. *Vestnik MSTU «Stankin»*. 2016. No. 3 (38). P. 66–69. (In Russ.).
9. Tolok A. V., Tolok N. B. Local R-Functional Modelling (LRFM) // Proc. of the 31st Intern. conf. on Computer Graphics and Vision, Sep. 27–30, 2021. Nizhny Novgorod, 2021. Vol. 3027. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3027/paper64.pdf> (accessed: 15.12.2022). (In Engl.).
10. E Vin Tun, Markin L. V. Postroyeniye retseptornykh geometricheskikh modeley ob'yektov slozhnykh tekhnicheskikh form [Construction of receptor geometric models for objects of complex technical forms] // Geometriya i grafika. *Geometry & Graphics*. 2019. Vol. 7, no. 4. P. 44–56. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-44-56. (In Russ.).
11. Ziatdinov R., Kendzhiro T. M. Krivyye vysokogo kachestva i ikh primeneniye v geometricheskom modelirovanii i esteticheskom dizayne [High-quality Curves and their Application in Geometric Modelling and Aesthetic Design.] // Sistemy proyektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta (CAD/CAM/PDM–2012). *Systems for the Design, Production Preparation and Lifecycle Management of Industrial Products (CAD/CAM/PDM–2012)*. Moscow, 2012. P. 145–147. (In Russ.).
12. Korotkiy V. A. Kubicheskiye krivyye v inzhenernoy geometrii [Cubic curves in engineering geometry] // Geometriya i grafika. *Geometry & Graphics*. 2020. Vol. 8, no. 3. P. 3–24. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-3-24. (In Russ.).

13. Ryazanov S. A., Reshetnikov M. K. Analiticheskiye zavisimosti kinematicheskogo formoobrazovaniya nachal'nykh poverkhnostey elementov chervyachnoy peredachi [Analytical dependences of the kinematic forming primary surfaces of the worm gear] // Geometriya i grafika. *Geometry & Graphics*. 2019. Vol. 7, no. 2. P. 65–75. DOI: 10.12737/article\_5d2c2dda42fda7.79858292. (In Russ.).

14. Sycheva A. A., Plaksin A. M. Funktsional'no-voksel'noye modelirovaniye trayektorii dvizheniya instrumenta pri frezerovanii karmannoy oblasti [Functional-voxel Modeling of the Toolpath when Milling a Pocket Area] // GrafiKon 2022. *GrafiKon 2022*. Ryazan, 2022. P. 896–902. (In Russ.).

15. Shutova K. Yu., Sycheva A. A. Using a Functional Voxel Model to Simulate Swarm Motion of a Multi-agent System in a Confined Space // Technologies for Smart Cities. 2023. P. 21–30. DOI: 10.1007/978-3-031-05516-4\_2. ISBN 978-3-031-05515-7. (In Engl.).

---

**SYCHEVA Anastasia Antonovna**, Researcher of Laboratory 18, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow. SPIN-code: 3256-3877

AuthorID (RSCI): 1103737

ORCID: 0000-0003-3230-4271

AuthorID (SCOPUS): 57220899747

ResearcherID: AAI-3664-2021

Correspondence address: a.a.sycheva@mail.ru

**PLAKSIN Alexander Mikhailovich**, Head of Bureau, Lavochkin Association, Moscow Region, Khimki.

SPIN-code: 6761-4183

AuthorID (RSCI): 881905

ORCID: 0000-0001-9390-8322

AuthorID (SCOPUS): 57218766684

ResearcherID: ADG-6336-2022

Correspondence address: a.m.plaksin@gmail.com

#### For citations

Sycheva A. A., Plaksin A. M. The functional voxel algorithm for iterative composition of complex contours // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 105–111. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-105-111.

Received January 15, 2023.

© A. A. Sycheva, A. M. Plaksin



# ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.313.8  
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-112-118

**В. В. ХАРЛАМОВ**  
**Ю. В. МОСКАЛЕВ**  
**А. Ю. МИЛЮТИН**  
**А. П. ПОПОВ**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕЛИЧИНЫ НЕРАВНОМЕРНОГО ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА РОТОРЕ

В статье предложен подход к определению неравномерного воздушного зазора синхронной машины с призматическими постоянными магнитами на роторе, при котором распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора имеет форму, близкую к синусоидальной. Расчет магнитного поля модели электрической машины с заданными геометрическими размерами и свойствами материалов элементов выполнен в программе *FEMM*. Для решения оптимизационной задачи использован метод Хука–Дживса, ограничения учитывались методом штрафных функций. В результате моделирования магнитного поля электрической машины с рассчитанным оптимальным неравномерным воздушным зазором получена кривая распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности статора, среднее отклонение которой от синусоидальной кривой составило 4,8 %.

**Ключевые слова:** электрическая машина, постоянный магнит, магнитное поле, воздушный зазор, оптимизация.

Электрические машины (ЭМ) с постоянными магнитами получают все большее распространение в различных отраслях промышленности, энергетических системах и на транспорте [1–7]. Такие ЭМ имеют высокие энергетические и массогабаритные показатели, более простую и надежную конструкцию возбудителя из-за отсутствия обмотки возбуждения, элементов скользящего токосъема, ис-

точника постоянного тока. Например, при равной мощности тяговой асинхронной ЭМ и синхронной ЭМ с постоянными магнитами (СМПМ) габариты и масса синхронной ЭМ меньше на 25 % [7].

Необходимо отметить некоторые недостатки таких ЭМ, среди которых высокая стоимость из-за наличия в конструкции дорогостоящих постоянных магнитов; сложность регулирования магнитного

потока; влияние механических и тепловых воздействий на постоянные магниты. Для изготовления ЭМ с постоянными магнитами необходима более сложная технология сборки из-за наличия сильных магнитных полей, при этом необходимо учитывать отличия характеристик отдельных магнитов, чтобы обеспечить симметрию магнитной системы ЭМ.

Рассмотрим ЭМ с постоянными магнитами, размещенными на цилиндрическом роторе. В настоящее время разработано большое количество схем размещения постоянных магнитов различной формы на цилиндрическом роторе [2–4; 8, 9]. На практике широкое распространение получили постоянные магниты в виде прямой четырехугольной призмы. Использование призматических магнитов позволяет упростить изготовление и повысить мощность ЭМ [2].

Существует несколько часто применяемых схем размещения призматических магнитов, встроенных в ротор: с радиальным намагничиванием; с тангенциальным намагничиванием; с намагничиванием по схеме Хальбаха; V-образная схема [2–4; 8, 9]. Каждая из этих схем размещения магнитов имеет свои особенности расположения магнитомягких и немагнитных материалов (втулок, полюсных наконечников, секторов между магнитами и т.п.), что позволяет уменьшить поля рассеивания, увеличить рабочий магнитный поток, снизить содержание высших гармоник индукции в воздушном зазоре [4, 8, 9].

Среди перечисленных выше схем размещения призматических магнитов наименьшее содержание высших гармоник будет при использовании схемы Хальбаха [9, 10], наибольшее среднее значение модуля магнитной индукции у ротора с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов [2, 10].

Для улучшения показателей работы магнитоэлектрических ЭМ, снижения потерь мощности, пульсации момента, вибрации, шума необходимо уменьшить значения гармонических составляющих магнитного поля в воздушном зазоре, что может быть реализовано за счет создания неравномерного воздушного зазора между сердечником статора и ротором [4].

Рассмотрим подход для определения оптимального закона изменения величины воздушного зазора между сердечником статора и ротором СМПМ, при котором по внутренней расточке статора будет обеспечено синусоидальное распределение нормальной составляющей магнитной индукции.

При решении задачи приняты следующие допущения: для исключения зубовых гармоник сердечник статора принят гладким; высококоэрцитивные магниты имеют одинаковые характеристики, отсутствует эксцентриситет ротора, ЭМ работает в режиме холостого хода.

В качестве примера рассмотрим СМПМ с четырьмя магнитными полюсами. Четырехполюсные СМПМ позволяют обеспечить меньшую частоту перемагничивания сердечника статора и магнитные потери в нем, чем ЭМ с большим числом полюсов, это обусловило широкое распространение таких ЭМ на практике [8].

Для моделирования магнитного поля ЭМ методом конечных элементов на практике часто используются различные пакеты программ, например, *ELCUT*, *FEMM*, *ANSYS*, *COMSOL* и другие [9, 11]. Эти программы позволяют по заданным геометрическим размерам, свойствам материалов элементов магнитной цепи рассчитывать картину магнитного

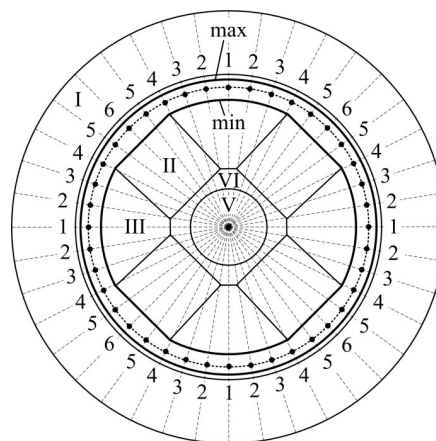


Рис. 1. Схема магнитной системы СМПМ для оптимизации неравномерного воздушного зазора: I — сердечник статора; II — постоянный магнит на роторе; III — сегмент из магнитомягкого материала; IV — втулка из немагнитного материала; V — вал

поля, а также определять необходимые для анализа количественные характеристики поля.

Предложенный подход к определению неравномерного воздушного зазора СМПМ, при котором обеспечивается синусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре, можно пояснить с использованием схемы на рис. 1.

Вдоль внутренней окружности сердечника статора на рис. 1 изображена окружность штриховой линией, которая соответствует внешней поверхности ротора ЭМ с равномерным воздушным зазором. На этой окружности показано  $N$  точек, полученных при пересечении окружности с радиальными линиями (количество точек при расчете может быть увеличено). Две окружности, обозначенные как «min» и «max», ограничивают минимальное и максимальное значения диапазонов, в которых могут по радиальным штриховым линиям перемещаться эти точки.

Изменение величины воздушного зазора реализуется за счет смещения в отрицательном  $-\Delta_i$  (к линии «min») или положительном  $+\Delta_i$  (к окружности «max») направлениях каждой из точек.

Для обеспечения симметрии магнитной системы ЭМ на полюсных делениях номера точек повторяются, поэтому количество независимых переменных модели  $k$  значительно меньше, чем количество точек, размещенных вдоль окружности ротора  $N$ . На рис. 1 показано сорок точек на окружности ротора из них только шесть являются переменными модели  $\pm \Delta_k$ , описывающей распределение магнитной индукции по внутренней окружности сердечника статора.

Необходимо отметить, что обычно величина воздушного зазора ЭМ значительно меньше по сравнению с размерами сердечника статора и ротора, чем воздушный зазор, изображенный на рис. 1.

Вектор магнитной индукции в каждой точке вдоль окружности внутренней расточки статора можно представить в виде геометрической суммы векторов нормальной  $B_n$  и тангенциальной  $B_t$  составляющих. Модуль вектора магнитной индукции можно рассчитать по выражению:

$$B_i = \sqrt{B_n^2 + B_t^2}. \quad (1)$$

Значения магнитной индукции определяются для каждой  $i$ -й точки пересечения окружности внутренней расточки статора с радиальными линиями.

Среднее значение модуля магнитной индукции определено следующим образом:

$$B_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i. \quad (2)$$

При решении оптимизационной задачи необходимо определить такие значения переменных модели  $\pm \Delta_k$ , при которых изменение нормальной составляющей индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора будет синусоидальным:

$$B_{n_{i,\sin}}(l_i) = B_{cp} \sin\left(\frac{2}{R_1} l_i - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

где  $R_1$  — радиус внутренней окружности сердечника статора, м;

$l_i$  — длина по внутренней окружности сердечника статора от точки начала отсчета до заданной  $i$ -й точки, м.

Оптимальный неравномерный воздушный зазор будет определен при минимизации следующей функции:

$$F(\Delta\delta_k) = \sum_{i=1}^N (B_{n_{i,\text{расч}}}(l_i, \Delta\delta_k) - B_{n_{i,\sin}}(l_i))^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $B_{n_{i,\text{расч}}}(l_i, \Delta_k)$  — модуль вектора нормальной составляющей индукции в  $i$ -й точке внутренней окружности сердечника статора, рассчитанной в результате моделирования при заданных значениях независимых переменных  $\Delta_k$ , Тл.

Для моделирования магнитного поля в программе *FEMM* [12] составлена двухмерная модель ЭМ с высококоэрцитивными магнитами на роторе со следующими размерами: внешний диаметр ротора — 100 мм, воздушный зазор — 1 мм, внутренний диаметр сердечника статора — 102 мм, наружный диаметр сердечника статора — 160 мм. Длина окружности по внутренней расточке статора ( $L$ ) равна 320 мм. Все элементы магнитной цепи заданы материалами из библиотеки программы *FEMM*: из магнитомягкого материала выполнены сердечник статора и сегменты между магнитами (сталь марки М19), вал ротора стальной, немагнитная

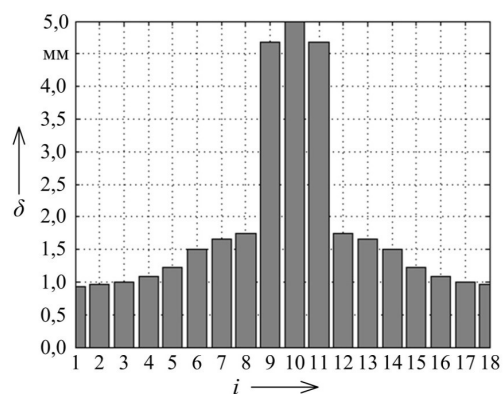


Рис. 2. Оптимальный неравномерный воздушный зазор на одном полюсном делении СМПМ

штука алюминиевая, неодимовые магниты *NdFeB* (37 MGOe с коэрцитивной силой 950 кА/м). Высота и ширина призматических магнитов равны 28 мм и 24 мм соответственно.

Для решения оптимизационной задачи использован метод Хука — Дживса, при этом вдоль окружности ротора задано 72 точки ( $N = 72$ ), количество переменных модели  $\Delta_k$  равно 10. Начальное приближение независимых переменных принято равным  $\Delta_k = 0$  (равномерный воздушный зазор). Максимальное значение, ограниченное окружностью «max» (рис. 1),  $\Delta_{k,\max} = +0,5$  мм, минимально допустимые значения, ограниченные линией «min»,  $\Delta_{k,\min} = [-2,5; -2,5; -2,5; -2,5; -2,5; -2,5; -2,4; -3,3; -3,8; -4]$  мм.

Формирование множества схем магнитной системы СМПМ с различными неравномерными воздушными зазорами в *FEMM* выполнено с использованием языка программирования *Lua* [12].

В результате решения задачи определен оптимальный вектор независимых переменных:  $\Delta_{k,opt} = [0,0625; 0,03125; 0; -0,09375; -0,21875; -0,5; -0,65625; -0,75; -3,6875; -4]$  мм.

По известному оптимальному вектору независимых переменных  $\Delta_{k,opt}$  можно определить изменение величины воздушного зазора на одном полюсном делении СМПМ (рис. 2), за нулевой уровень принята окружность внутренней поверхности статора, начало отсчета — точка на внутренней окружности статора, соответствующая середине сегмента из магнитомягкого материала на роторе.

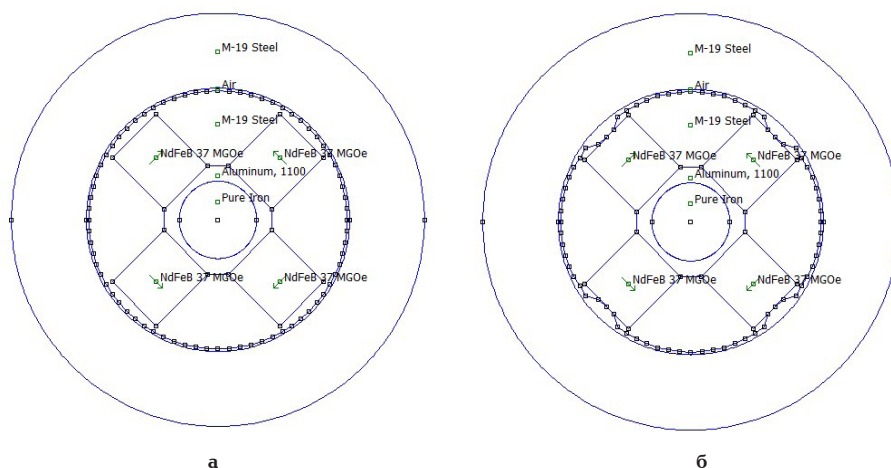


Рис. 3. Схема магнитной системы СМПМ в программе FEMM

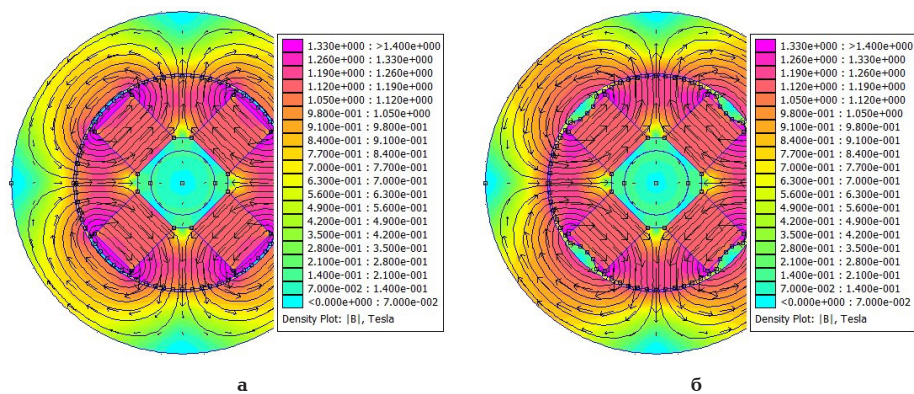


Рис. 4. Картина магнитного поля четырехполюсной СМПМ

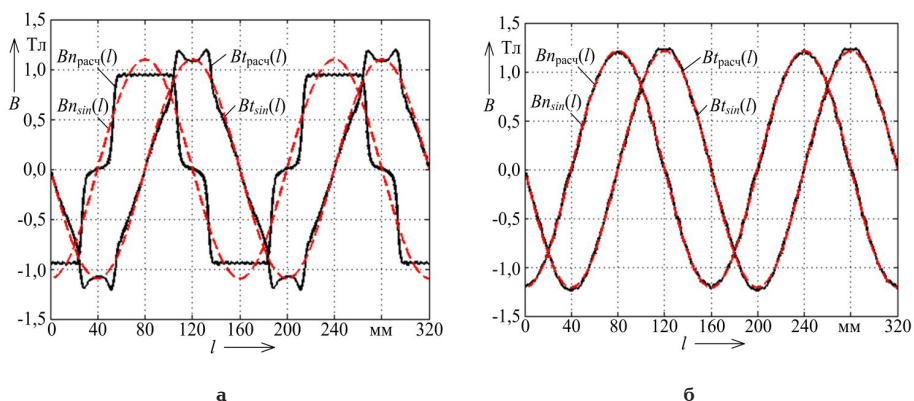


Рис. 5. Графики распределения нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора

На рис. 3 приведены схемы магнитной системы СМПМ с равномерным (а) и оптимальным неравномерным воздушным зазором (б), составленные в программе *FEMM*.

Картинки магнитного поля четырехполюсной СМПМ с равномерным (а) и оптимальным неравномерным воздушным зазором (б) изображены на рис. 4.

На рис. 5 представлены графики распределения нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора с равномерным (а) и неравномерным воздушным зазором (б).

Среднее значение модуля магнитной индукции, рассчитанное по формуле (2), составило 1,097 Тл для равномерного воздушного зазора (1 мм) и 1,210 Тл для неравномерного воздушного зазора. Увеличение магнитной индукции в воздушном зазоре достигается за счет уменьшения полей рассеивания, которые замыкаются по ферромагнитным элементам ротора, размещенным между постоянными магнитами и равномерным воздушным зазором (рис. 3а).

Для того чтобы оценить отличие расчетной кривой нормальной составляющей индукции от синусоидальной кривой, использовано выражение:

$$\delta B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Bn_{i,pact}(l_i, \Delta\delta_{k,opt}) - Bn_{i,sin}(l_i)}{Bn_{i,sin}(l_i)} \right| 100 \% \quad (5)$$

Среднее отклонение расчетной кривой нормальной составляющей магнитной индукции при неравномерном воздушном зазоре от синусоидальной кривой, определенное по выражению (5), составило

4,8 %. При расчете не учитывались точки, в которых  $Bn_{sin}(l)$  принимает нулевые значения.

Использование предложенного подхода определения неравномерного воздушного зазора СМПМ позволит уменьшить содержание высших гармоник в рабочем магнитном потоке и, следовательно, улучшить показатели работы ЭМ. При этом в спектре магнитной индукции, так же как при равномерном воздушном зазоре, останутся зубцовые гармоники.

В результате можно сделать следующие выводы:

1. Предложен подход для оптимизации величины неравномерного воздушного зазора СМПМ с постоянными магнитами призматической формы на роторе с тангенциальным направлением намагниченности, при котором распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора будет близким к синусоидальному.

2. В качестве примера определен неравномерный воздушный зазор для четырехполюсной СМПМ, моделирование магнитного поля выполнено в программе *FEMM*. Для решения оптимизационной задачи использован метод Хука – Дживса, ограничения учитывались методом штрафных функций.

3. Для СМПМ с равномерным и оптимальным неравномерным воздушным зазором получены графические изображения магнитного поля, графики распределения нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора. Среднее отклонение расчетной кривой изменения нормальной составляющей индукции по внутренней окружности сердечника статора от синусоидальной кривой составило 4,8 %.

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. Санкт-Петербург: Питер, 2010. 350 с. ISBN 978-5-469-01381-5.
2. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины. Москва: Высшая школа, 1990. 416 с. ISBN 5-06-000719-7.
3. Furlani Ed. P. Permanent Magnet and Electromechanical Devices. New York: Academic press, 2001. 537 p. ISBN 0-12-269951-3.
4. Магин В. В. Особенности проектирования роторов малощумных синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2015. Т. 144, № 1. С. 3–15.
5. Татевосян А. А., Мищенко В. С. Моделирование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 90–93.
6. Кулешов Е. В., Сергеев В. Д. Быстроходный магнито-электрический синхронный ветрогенератор // Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2003. С. 338–344.
7. Синхронные тяговые двигатели с возбуждением от постоянных магнитов // Железные дороги мира. 2011. № 6. С. 38–42.
8. Вавилов В. Е. Выбор магнитной системы ротора электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами // Вестник машиностроения. 2018. № 1. С. 26–29.
9. Геча В. Я., Захаренко А. Б., Надкин А. К. Проектирование электромашин с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2020. Т. 177, № 4. С. 3–10.
10. Харламов В. В., Москалев Ю. В., Серкова Л. Е. Анализ схем размещения постоянных магнитов на роторе четырехполюсной электрической машины // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 2. С. 73–79. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-73-79.
11. Андреева Е. Г., Татевосян А. А., Семина И. А. Исследование моделей магнитных систем открытого типа в комплексах программ ELCUT и ANSYS // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 231–235.

12. Finite Element Method Magnetics. URL: <http://www.femm.info> (дата обращения: 24.10.2022).

**ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: [emoe@omgups.ru](mailto:emoe@omgups.ru)

**МОСКАЛЕВ Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 1422-1951

AuthorID (РИНЦ): 657144

ORCID: 0000-0002-0970-937X

AuthorID (SCOPUS): 57200088110

Адрес для переписки: [yuriyvm@mail.ru](mailto:yuriyvm@mail.ru)

**МИЛЮТИН Алексей Юрьевич**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

Адрес для переписки: [emoe@omgups.ru](mailto:emoe@omgups.ru)

**ПОПОВ Анатолий Петрович**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

Адрес для переписки: [emoe@omgups.ru](mailto:emoe@omgups.ru)

#### Для цитирования

Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю., Попов А. П. Оптимизация величины неравномерного воздушного зазора синхронной машины с постоянными магнитами на роторе // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 112–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-112-118.

Статья поступила в редакцию 11.01.2023 г.

© В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, А. Ю. Милютин, А. П. Попов

## UNEVEN AIR GAP OPTIMIZATION OF SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT ROTOR MAGNETS

The article proposes an approach to determining the uneven air gap of a synchronous machine with prismatic magnets on the rotor, in which the distribution of the normal component of magnetic induction along the inner circumference of the stator core has a shape close to sinusoidal. The calculation of the magnetic field of an electric machine model with the specified geometric dimensions and properties of the element materials is performed in the FEMM program. To solve the optimization problem, the Hook-Jeeves method is used, restrictions are taken into account by the method of penalty functions. As a result of modeling the magnetic field of an electric machine with a calculated optimal uneven air gap, a distribution curve of the normal component of magnetic induction along the inner circumference of the stator is obtained, the average deviation of which from the sinusoidal curve is 4,8 %.

**Keywords:** electrical machine, permanent magnet, magnetic field, air gap, optimization.

### References

1. Vol'dek A. I., Popov V. V. *Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electrical machines. AC machines]. Saint Petersburg, 2010. 350 p. ISBN 978-5-469-01381-5. (In Russ.).
2. But D. A. *Beskontaktnyye elektricheskiye mashiny* [Non-contact electrical machines]. Moscow, 1990. 416 p. ISBN 5-06-000719-7. (In Russ.).
3. Furlani Ed. P. *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*. New York: Academic press, 2001. 537 p. ISBN 0-12-269951-3. (In Engl.).
4. Magin V. V. *Osobennosti proyektirovaniya rotorov maloshchmnykh sinkhronnykh dvigateley s vzbuzhdeniyem ot postoyannykh magnitov* [Rotor design special features of the low-noise synchronous motors with a constant excitation from permanent magnets] // *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM. Electromechanical Matters. VNIEM Studies*. 2015. Vol. 144, no. 1. P. 3–15. (In Russ.).
5. Tatevosyan A. A., Mishchenko V. S. *Modelirovaniye magnitnogo polya sinkhronnogo generatora s postoyannymi magnitami* [Simulation of magnetic field of synchronous generator with permanent magnets] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2016. No. 4 (148). P. 90–93. (In Russ.).
6. Kuleshov E. V., Sergeyev V. D. *Bystrokhodnyy magnitoelektricheskiy sinkhronnyy vetrogenerator* [High-speed magnetolectric synchronous wind generator] // *Sovremennyye tendentsii v razvitiy i konstruirovaniy kollektornykh i drugikh elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii. Current Trends in the Development and Design of Collector and other Electromechanical Energy Converters*. Omsk, 2003. P. 338–344. (In Russ.).
7. *Sinkhronnyye tyagovyye dvigateli s vzbuzhdeniyem ot postoyannykh magnitov* [Synchronous traction motors with permanent magnet excitation] // *Zheleznyye dorogi mira. The World's Railways*. 2011. No. 6. P. 38–42. (In Russ.).
8. Vavilov V. E. *Vybor magnitnoy sistemy rotora elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii s vysokokoertsivnyimi postoyannymi magnitami* [Selection of magnetic system of rotor of energy electromechanical converters with high-coercive permanent magnets] // *Vestnik mashinostroyeniya. Engineering Journal*. 2018. No. 1. P. 26–29. (In Russ.).
9. Gecha V. Ya., Zakharenko A. B., Nadkin A. K. *Proyektirovaniye elektromashiny s postoyannymi magnitami, namagnichennymi po skheme Khal'bakha* [Designing an electrical machine with permanent magnets magnetized according to Halbach scheme] // *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM. Electromechanical Matters. VNIEM Studies*. 2020. Vol. 177, no. 4. P. 3–10. (In Russ.).
10. Kharlamov V. V., Moskaev Yu. V., Serkova L. E. *Analiz skhem razmeshcheniya postoyannykh magnitov na rotore chetyrekhpolusnoy elektricheskoy mashiny* [Analysis of permanent magnet arrangement on the rotor of a four-pole electric machine] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2019. Vol. 7, no. 2. P. 73–79. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-73-79. (In Russ.).
11. Andreyeva E. G., Tatevosyan A. A., Semina I. A. *Issledovaniye modeley magnitnykh sistem otkrytogo tipa v kompleksakh programm ELCUT i ANSYS* [Investigation of open magnetic system models in ELCUT and ANSYS software packages] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2013. No. 2 (120). P. 231–235. (In Russ.).
12. *Finite Element Method Magnetics*. URL: <http://www.femm.info> (accessed: 24.10.2022). (In Engl.).

**KHARLAMOV Viktor Vasilyevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Electrical Machines and

General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 5093-8463

AuthorID (RSCI): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Correspondence address: emoe@omgups.ru

**MOSKALEV Yuriy Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 1422-1951

AuthorID (RSCI): 657144

ORCID: 0000-0002-0970-937X

AuthorID (SCOPUS): 57200088110

Correspondence address: yuriyvm@mail.ru

**MILYUTIN Aleksey Yuryevich**, Graduate Student of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

Correspondence address: emoe@omgups.ru

**POPOV Anatoliy Petrovich**, Graduate Student of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

Correspondence address: emoe@omgups.ru

#### For citations

Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Milutin A. Yu., Popov A. P. Uneven air gap optimization of synchronous machine with permanent rotor magnets // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 112–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-112-118.

Received January 11, 2023.

© V. V. Kharlamov, Yu. V. Moskalev,  
A. Yu. Milutin, A. P. Popov

## УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Увеличение мощности силовых полупроводниковых преобразователей, эксплуатируемых в железнодорожной отрасли, связано с использованием в них групповых соединений силовых полупроводниковых приборов, разброс в параметрах которых, а следовательно, их неодинаковая нагрузка, обуславливает снижение надежности работы силовых полупроводниковых преобразователей в целом. Из-за этого возникает необходимость в разработке и внедрении инновационных методик и устройств экспресс-диагностирования с целью выявления потенциально ненадежных полупроводниковых приборов, причем выполнение технического диагностирования не должно быть связано с демонтажом электрических цепей преобразователей. Предлагается методика определения потенциально ненадежных силовых полупроводниковых приборов в групповых соединениях по результатам анализа распределения обратных токов в параллельных ветвях, позволившая создать серию устройств диагностирования силовых полупроводниковых приборов в преобразователях как с резисторами связи, так и без них. Методическая погрешность измерений, выполненных с помощью разработанных устройств экспресс-диагностики преобразователей, не превышает нормативную величину, равную 10 %.

**Ключевые слова:** полупроводниковый прибор, экспресс-диагностирование, обратный ток, резисторы связи, аналогово-цифровой преобразователь, методическая погрешность измерения.

**Введение.** Несмотря на значительный прогресс в области силовой электроники, в эксплуатации, в том числе и на железнодорожном транспорте, остается большое количество силовых полупроводниковых преобразователей (СП), имеющих групповое (параллельное) соединение силовых полупроводниковых приборов (СПП), например, диодов и тиристоров. Использование параллельного соединения предполагает возможность увеличения токовой нагрузки, а следовательно, общей мощности преобразователя. Вместе с этим неравенство обратных напряжений (в абсолютных значениях) эксплуатируемых приборов обуславливает значительный разброс их обратных токов, что понижает надежность его работы и может инициировать разрушение полупроводниковой структуры прибора и привести к выходу из строя СП. Необходимость

решения данной проблемы обуславливает актуальность разработки и внедрения новых методик и устройств для диагностирования не только всего группового соединения, но и отдельных СПП. В результате появляется возможность оценить текущее состояние СПП в преобразователях, спрогнозировать их остаточный ресурс и выбраковать СПП со скрытыми дефектами [1]. Определенной перспективой обладает методика экспресс-диагностирования СП без демонтажа последнего, базирующаяся на определении значений обратных сопротивлений СПП, находящихся в плече преобразователя.

**Постановка задачи.** Оценка распределения обратных токов СПП в преобразователе, в котором используются резисторы связи. Решение вопроса повышения надежности работы СП с помощью инженерной методики определения в плече пре-

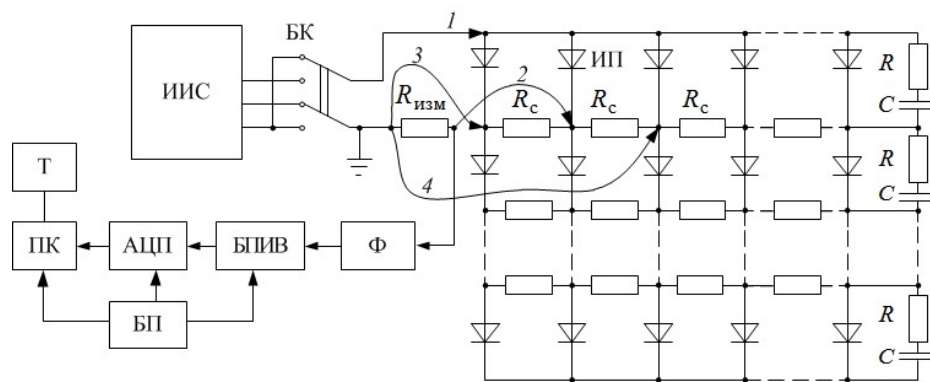


Рис. 1. Устройство экспресс-диагностирования СПП в преобразователе при наличии резисторов связи

образователя потенциально ненадежных СПП без разборки последнего, разработка устройств экспресс-диагностирования СП [2].

При разработке устройств экспресс-диагностирования СП и СПП предполагалось выполнение следующих требований:

- требуемая достоверность измерений;
- небольшие массогабаритные показатели;
- простота в обслуживании;
- возможность осуществлять контроль параметров СПП без демонтажа преобразователя;
- определение состояния СПП при минимальных затратах времени и труда [3, 4].

**Устройство экспресс-диагностирования СПП с резисторами связи.** Резисторы связи используют для выравнивания обратных напряжений СПП и уменьшения количества шунтирующих резисторов и RC-цепей в СП, например, УВКМ-5, ПВЭ-3, ВИП 2200М, ВИП 4000, УВКМ-6. Для их диагностирования возможно применение устройств, описанных в работе [5]. Однако данные устройства могут быть использованы для измерения обратных токов и токов утечки в СПП только для конкретного класса СП. Примером может служить случай, когда резисторы связи имеют общую точку (ВИП 4000, ВИП 2200М). Однако для преобразователей других схемотехнических решений диагностика этими устройствами невозможна [6, 7]. Речь идет о преобразователях, таких как УВКМ-6, УВКМ-А2, ПВЭ, УВКМ-5 и др.

Сотрудниками на кафедре «Электротехника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО ПГУПС было разработано устройство экспресс-диагностирования СП, в котором резисторы связи не имеют общей точки [8, 9] (рис. 1).

Работа устройства (измерение тока утечки и обратного тока СПП, находящегося в плече преобразователя) осуществляется в следующей последовательности. Вывод 1 устройства подсоединяется к катоду или аноду испытуемого полупроводникового прибора (ИП), а вывод 2 устройства — к аноду или катоду ИП. Вариант соединения зависит от расположения ИП в плече СП. Затем к выводам резисторов связи  $R_c$  данного параллельного ряда СПП подключаются выводы 3 и 4 устройства. Напряжение на ИП подается через выводы 1 и 2 устройства и измерительный резистор  $R_{изм}$  с источника испытательных импульсов (ИИС).

При подключении резисторов связи  $R_c$  непосредственно к выводам 3, 4 образуется электрическая цепь (рис. 2).

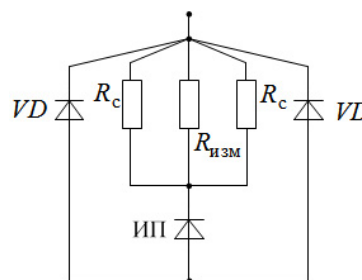


Рис. 2. Схема распределения обратного тока СПП

Если величина сопротивления измерительного резистора  $R_{изм}$  выбрана согласно следующему условию:

$$\frac{0,5R_c}{R_{изм}} > 10, \quad (1)$$

то в основном весь ток утечки или обратный ток  $I_R$  испытуемого ИП будет протекать через  $R_{изм}$ , поэтому можно считать, что сигнал с последнего даст необходимую информацию о вышеупомянутом токе. Особо следует отметить, что на результаты измерений не окажут влияния обратные токи остальных СПП параллельного ряда, так как они не будут протекать через  $R_{изм}$ .

Сигнал с  $R_{изм}$  поступает в фильтрующий блок (Ф) (рис. 1). Затем измеренные величины приходят в блок преобразования измеряемых величин (БПИВ). Здесь измеряемый сигнал подвергается начальному преобразованию, далее он приходит в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), и в последующем — в блок преобразования кодов (ПК). Результат измерения отображается на табло (Т). Блоки ПК, АЦП и БПИВ имеют электрическое соединение с блоком питания (БП).

На результаты измерений основное влияние оказывает систематическая погрешность, так как процесс измерения осуществляется в стационарных условиях при постоянных испытательных сигналах. Величина методической погрешности определяется видом схемы подключения устройства диагностирования [10]. Методическая погрешность больше при четырехпроводной (рис. 3), чем при трехпроводной схеме подключения (рис. 4), примерно в 5 раз. Численное значение измерительного резистора  $R_{изм}$

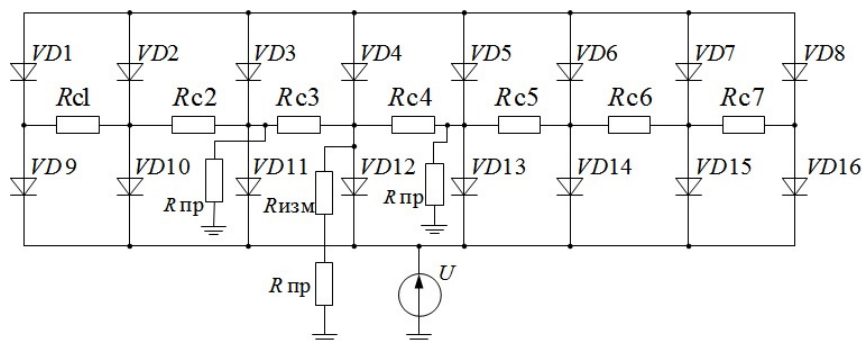


Рис. 3. Четырехпроводная схема подключения устройства экспресс-диагностирования (пример подключения к диодам № 11, 12, 13)

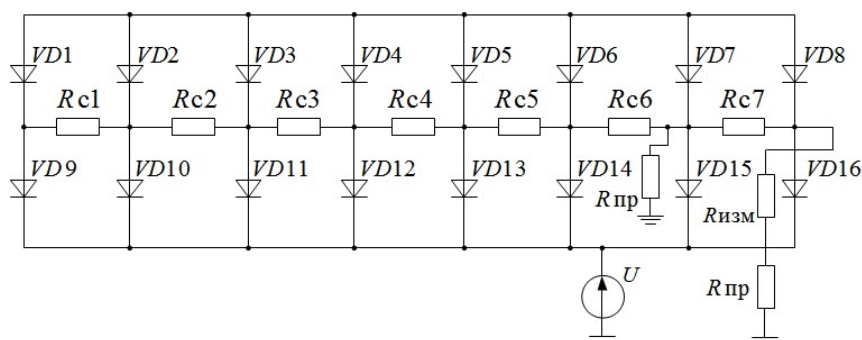


Рис. 4. Трехпроводная схема подключения устройства экспресс-диагностирования (пример подключения к диодам № 15, 16)

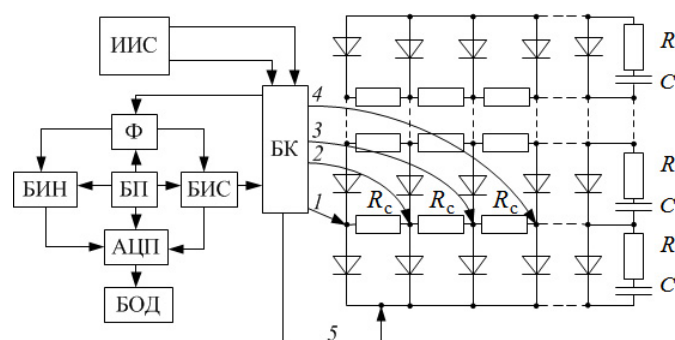


Рис. 5. Многофункциональное устройство экспресс-диагностирования СП с резисторами связи

также влияет на точность результата измерения. Схема подключения зависит от места нахождения в плече испытуемого СПП.

Следует отметить, что при выборе параметров соблюдалось условие (1). Как подтвердили результаты экспериментальных исследований, с помощью рассматриваемого устройства для экспресс-диагностирования обратного тока силового полупроводникового прибора возможно осуществить контроль технического состояния в СП при наличии резисторов связи без разборки последнего с допустимой (согласно нормативным документам) погрешностью.

**Многофункциональное устройство экспресс-диагностирования СПП с резисторами связи.** Для повышения точности измерений было разработано устройство экспресс-диагностики СП при наличии резисторов связи, имеющее те же функциональные возможности (рис. 5). На этом рисунке, помимо ранее приведенных, использованы следующие обозна-

чения: БИН — блок измерения напряжения; БК — блок коммутации; БОД — блок обработки данных; БИС — блок измерения сопротивления; 1, 2, 3, 4, 5 — выводы.

В основу принципа работы многофункционального устройства экспресс-диагностирования положен метод непосредственного измерения реальных значений сопротивлений резисторов связи  $R_c$  СП, косвенное определение токов в данных резисторах и последующий расчет токораспределения в параллельных ветвях (по заданному алгоритму). Использование микропроцессорной техники предоставило возможность обработать большой массив информации и увеличить точность измерения благодаря применению общеизвестных способов уменьшения погрешности [9, 11].

Процесс диагностирования реализуется следующим образом. Выводы 1, 2, 3, 4 подсоединяются к  $R_c$ , которые, в свою очередь, соединены с ИП. Общая точка ИП подключается к выводу 5 и осу-

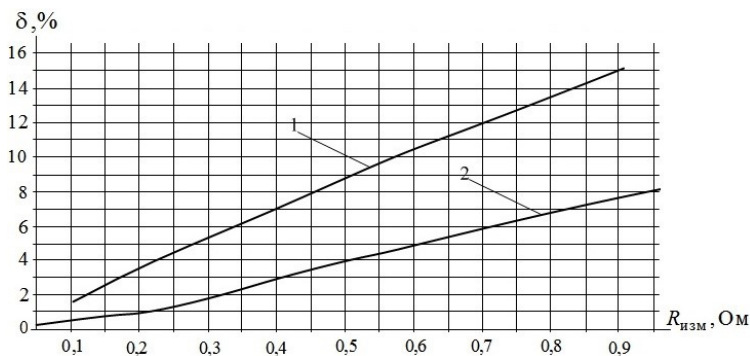


Рис. 6. Зависимость погрешности от величины измерительного резистора  $R_{изм}$ : 1 — для четырехпроводной схемы подключения устройства, 2 — для трехпроводной схемы подключения устройства

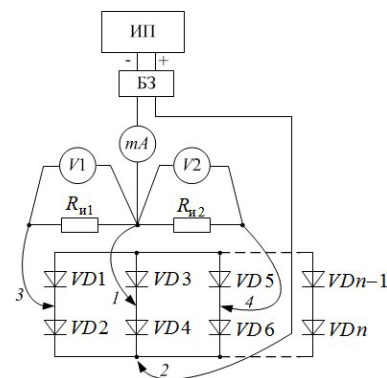


Рис. 7. Устройство диагностирования СПП в преобразователе без резисторов связи

пещвляется измерение напряжений на резисторах связи  $R_c$ .

Тестирующий сигнал с выхода источника испытательных сигналов (ИИС) идет через коммутационный блок (БК) и вывод 5 к катодам ИП. Измерение напряжения осуществляется в БИН, куда сигнал поступает с блока, фильтрующего составляющие высоких частот, в котором происходит выделение информативных сигналов, поступающих с выхода БК. В БИН осуществляется начальное преобразование измеряемого сигнала, после чего преобразованный сигнал поступает сначала на вход АЦП, а затем в БОД.

Для измерения значений  $R_c$  на них подается сигнал от БП через БИС и БК. Затем сигнал поступает на АЦП, а потом — на БОД, где определяются значения токов в ветвях СП (используется метод узловых напряжений при допущении линейности обратной ветви вольтамперной характеристики СПП).

От количества  $R_c$  зависит число выводов устройства согласно формуле  $(n+2)$ , где  $n$  — количество резисторов связи в параллельном ряду.

Хотя использование многофункционального устройства экспресс-диагностирования СП с  $R_c$  позволяет повысить точность определения параметров СПП, находящихся в плече преобразователя, результаты измерений содержат составляющие систематической погрешности.

Напомним, что систематическая погрешность состоит из нескольких составляющих:

$$\delta_c = \delta_{и} + \delta_{м} + \delta_{сп} + \delta_{о},$$

где  $\delta_{и}$  — инструментальная погрешность;

$\delta_{м}$  — погрешность метода;

$\delta_{сп}$  — субъективная погрешность;

$\delta_{о}$  — погрешность из-за внешних условий.

Благодаря тому, что измерения выполняются при нормальных условиях,  $\delta_{о} \leq 1\%$ .

С учетом применения АЦП субъективная погрешность не учитывается (она не превышает одного процента).

ГОСТ 24461-80 регламентирует максимальное значение погрешности измерения обратного тока не выше 10 %, поэтому погрешность метода не должна превысить 7–8 %. Руководствуясь этими приоритетами при моделировании подключения устройства экспресс-диагностирования СП, оценивалось в первую очередь влияние на погрешность метода различных видов схем токораспределения (трехпроводной и четырехпроводной схем подклю-

чения устройства). Эта погрешность обусловлена наличием в параллельных ветвях  $RC$ -цепей,  $R_c$ , а также самих СПП. Она не устраняется увеличением количества измерений. Более того, погрешность метода сложно оценить из-за значительного различия в значениях  $R_c$  и обратных сопротивлений для разных типов СПП. Здесь также следует упомянуть влияние сопротивлений контакта, разброс фактических параметров  $R_c$  и т. д., что в конечном счете значительно усложняет обработку результата измерений.

**Результаты эксперимента.** Результаты моделирования процесса диагностирования СП рассматриваемым устройством в программе MULTISIM показали, что относительная погрешность измерения обратного тока  $\delta$  зависит от значения сопротивления измерительного резистора ( $R_{изм}$ ) и типа схемы подключения (рис. 6). Моделирование выполнялось при неизменном значении сопротивления связи  $R_c = 10$  Ом, испытательном напряжении  $U_{исп} = 100$  В; сопротивлении соединительных проводов принято  $R_{пр} = 0,007$  Ом.

**Устройство диагностирования СПП в преобразователе без резисторов связи.** СП без резисторов связи получили широкое распространение, однако параметры СПП также необходимо контролировать и желательно проводить диагностирование без демонтажа преобразователя. Частично эту задачу решает устройство, разработанное при участии авторов (рис. 7). Следует отметить, что данное устройство позволяет выполнить диагностику СПП при наличии короткого замыкания в одной или даже нескольких ветвях СПП.

Источник питания (ИП), блок защиты (БЗ), миллиамперметр ( $mA$ ), вольтметры ( $V1$  и  $V2$ ), первый измерительный щуп 1, вывод 2 БЗ, дополнительные измерительные щупы 3 и 4, измерительные резисторы ( $R_{и1}$  и  $R_{и2}$ ) — основные составляющие рассматриваемого устройства

Процедура определения ветви с короткозамкнутой последовательно соединенными СПП следующая: сначала вывод 2 БЗ подключают к катодной группе СП, затем измерительные щупы 1, 3, 4 последовательно соединяют с анодами испытуемых СПП катодной группы СП. При достижении необходимого значения напряжения отключение ИП обеспечивается БЗ [9].

Величина сопротивлений резисторов  $R_{и1}$  и  $R_{и2}$ , выбрана согласно условию:

$$RJ_{ист.пит.} \leq U_{(то)},'$$

где  $R = R_{и1}$  и  $R_{и2}$  — сопротивления измерительных резисторов, Ом;

$RJ_{ист.шт.}$  — ток ИП, мА;

$U_{(то)}$  — пороговое напряжение испытуемых СПП, В.

Для защиты СПП от перегрузок в рабочем режиме использовалось устройство, описанное в работе [12].

**Заключение.** С помощью разработанных методов технического экспресс-диагностирования возможно определить потенциально ненадежные СПП посредством анализа распределения обратных токов в параллельных ветвях без разборки преобразователя с групповым соединением. Разработана и создана серия устройств диагностирования СПП в преобразователе как с резисторами связи, так и без них. Использование устройств экспресс-диагностирования обуславливает значительное снижение трудозатрат и времени, отводимого для технического обслуживания и ремонта СП, а также позволяет повысить надежность работы преобразователя за счет уменьшения количества отказов СПП из-за превентивного выявления приборов, находящихся в предотказном состоянии.

Методическая погрешность измерений, выполненных с помощью устройств экспресс-диагностирования преобразователей, не превышает 10 %, что является допустимым согласно требованиям нормативных документов.

#### Библиографический список

1. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Никонов А. В. Диагностирование силовых вентилях преобразователей тяговых подстанций // Известия Транссиба. 2015. № 3 (23). С. 79–85.
2. Song G., Wang X., Tang J. [et al.]. An on-line fault diagnosis method for power rectifier device based on fault current characteristic // 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/CICED.2016.7576260.
3. Ким К. К., Анисимов Г. Н., Чураков А. И. Средства электрических измерений и их поверка. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 316 с.
4. Ким К. К., Анисимов Г. Н., Барбарович В. Ю. [и др.]. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника. Санкт-Петербург: Питер, 2006. 367 с.
5. Капустин Л. Д., Копанев А. С., Лозановский А. Л. Надежность и эффективность электровозов ВЛ80 в эксплуатации. Москва: Транспорт, 1986. 175 с.
6. Мельниченко О. В., Иванов В. С. Анализ применения преобразователей в силовых схемах отечественного моторвагонного подвижного состава переменного тока // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 4 (135). С. 231–242. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-231-242.
7. Власьевский С. В., Мельниченко О. В., Мальшева О. А. Аварийные процессы работы тиристорного выпрямителя электровоза переменного тока // Электротехника. 2016. № 2. С. 12–16.
8. Курмашев С. М., Зазыбина Е. Б. Новые средства диагностики силовых полупроводниковых преобразователей // Научно-технический прогресс на транспорте России в XXI веке: всерос. науч. конф., 2–5 октября 2001 г. Москва, 2001. С. 46–48.

9. Курмашев С. М., Зазыбина Е. Б. Устройство диагностики силового полупроводникового преобразователя // Электротехника. 2001. № 2. С. 126.

10. Manohar S. S., Sahoo A., Subramaniam A., Panda S. K. Condition monitoring of power electronic converters in power plants — A review // 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICEMS.2017.8056371.

11. Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. Ленинград: Лениздат, 1987. 295 с.

12. Пат. 28293 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 3/08. Устройство защиты электрических машин постоянного тока от перегрузки / Курмашев С. М., Зазыбина Е. Б. № 2002121410/20; заявл. 12.08.2002; опубл. 10.03.2003, Бюл. № 7.

**КОРОЛЕВА Елена Борисовна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург. SPIN-код: 5664-6112

AuthorID (РИНЦ): 1031473

Адрес для переписки: elzazybina@yandex.ru

**КУРМАШЕВ Сергей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 1536-8652

AuthorID (РИНЦ): 362154

**КИМ Константин Константинович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3278-4938

AuthorID (РИНЦ): 690443

Адрес для переписки: kimkk@inbox.ru

**ТКАЧУК Антон Андреевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7335-2340

AuthorID (РИНЦ): 726854

Адрес для переписки: a.a.tkachuk@mail.ru

**КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

Адрес для переписки: kuznetsova.omgups@gmail.com

#### Для цитирования

Королева Е. Б., Курмашев С. М., Ким К. К., Ткачук А. А., Кузнецов А. А. Устройства экспресс-диагностирования силовых полупроводниковых приборов и полупроводниковых преобразователей // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-119-125.

Статья поступила в редакцию 10.02.2023 г.

© Е. Б. Королева, С. М. Курмашев, К. К. Ким, А. А. Ткачук, А. А. Кузнецов

## DEVICES FOR EXPRESS DIAGNOSTICS OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES AND SEMICONDUCTOR CONVERTERS

The increase in the power of power semiconductor converters operated in the railway industry is associated with the use of group connections of power semiconductor devices in them, the variation in the parameters of which, and, therefore, their unequal load, causes a decrease in the reliability of the power semiconductor converters as a whole. In this regard, it becomes necessary to develop and implement innovative methods and devices for express diagnostics in order to identify potentially unreliable semiconductor devices, and the implementation of technical diagnostics should not be associated with dismantling the electrical circuits of the converters. The method is proposed for determining potentially unreliable power semiconductor devices in group connections based on the results of analyzing the distribution of reverse currents in parallel branches, which made it possible to create a series of devices for diagnosing power semiconductor devices in converters, both with and without communication resistors. The methodological error of measurements made using the developed express diagnostics devices of the transducers do not exceed the standard value equal to 10 %.

**Keywords:** semiconductor device, express diagnostics, reverse current, communication resistors, analog-to-digital converter, methodical measurement error.

### References

1. Salita E. Yu., Kovaleva T. V., Nikonov A. V. Diagnostirovaniye silovykh ventiley preobrazovateley tyagovykh podstantsiy [The diagnostics of traction substations power rectifiers converters] // *Izvestiya Transsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2015. No. 3 (23). P. 79–85. (In Russ.).
2. Song G., Wang X., Tang J. [et al.]. An on-line fault diagnosis method for power rectifier device based on fault current characteristic // 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/CICED.2016.7576260. (In Engl.).
3. Kim K. K., Anisimov G. N., Churakov A. I. Sredstva elektricheskikh izmereniy i ikh poverka [Electrical measuring instruments and their verification]. Saint Petersburg, 2021. 316 p. (In Russ.).
4. Kim K. K., Anisimov G. N., Barbarovich V. Yu. [et al.]. Metrologiya, standartizatsiya, sertifikatsiya i elektroizmeritel'naya tekhnika [Metrology, standardization, certification and electrical measuring equipment]. Saint Petersburg, 2006. 367 p. (In Russ.).
5. Kapustin L. D., Kopanev A. S., Lozanovskiy A. L. Nadezhnost' i effektivnost' elektrovozov VL80 v ekspluatatsii [Reliability and efficiency of VL80 electric locomotives in operation]. Moscow, 1986. 175 p. (In Russ.).
6. Melnichenko O. V., Ivanov V. S. Analiz primeneniya preobrazovateley v silovykh skhemakh otechestvennogo motorvagonnogo podvizhnogo sostava peremennogo toka [Analysis of converter application in power circuits of domestic ac multiple unit rolling stock] // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018. Vol. 22, no. 4 (135). P. 231–242. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-231-242. (In Russ.).
7. Vlas'yevskiy S. V., Mel'nichenko O. V., Malysheva O. A. Avariynnye protsessy raboty tiristornogo vypryamitelya elektrovoza peremennogo toka [Emergency processes of an AC electric locomotive thyristor rectifier] // *Elektrotehnika. Electrics*. 2016. No. 2. P. 12–16. (In Russ.).
8. Kurmashev S. M., Zazybina E. B. Novyye sredstva diagnostiki silovykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley [New diagnostic tools for power semiconductor converters] // *Nauchno-tekhnicheskii progress na transporte Rossii v XXI veke. Scientific and Technological Progress in Russian Transport in the XXI Century*. Moscow, 2001. P. 46–48. (In Russ.).
9. Kurmashev S. M., Zazybina E. B. Ustroystvo diagnostiki silovogo poluprovodnikovogo preobrazovatelya [Power semiconductor converter diagnostic device] // *Eltrans-2001: Elektrifikatsiya i razvitiye zheleznodorozhnogo transporta Rossii. Traditsii, sovremennost', perspektivy. Eltrans-2001: Electrification*

and Development of Railway Transport in Russia. Traditions, Modernity, Prospects. Saint Petersburg, 2001. P. 126. (In Russ.).

10. Manohar S. S., Sahoo A., Subramaniam A., Panda S. K. Condition monitoring of power electronic converters in power plants — A review // 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICEMS.2017.8056371. (In Engl.).

11. Selivanov M. N., Fridman A. E., Kudryashova Zh. F. Kachestvo izmereniy. Metrologicheskaya spravochnaya kniga [Quality of measurement. Metrology reference book]. Leningrad, 1987. 295 p. (In Russ.).

12. Patent 28293 Russian Federation, IPC H 02 H 3/08. Ustroystvo zashchity elektricheskikh mashin postoyannogo toka ot peregruzki [Overload protection device for DC electric machines] / Kurmashev S. M., Zazybina E. B. No. 2002121410/20. (In Russ.).

---

**KOROLEVA Elena Borisovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Engineering and Heat Power Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Saint Petersburg.  
SPIN-code: 5664-6112

AuthorID (RSCI): 1031473

Correspondence address: elzazybina@yandex.ru

**KURMASHEV Sergey Mikhaylovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg.

SPIN-code: 1536-8652

AuthorID (RSCI): 362154

**KIM Konstantin Konstantinovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Electrical Engineering and

Heat Power Engineering Department, PGUPS, Saint Petersburg.

SPIN-code: 3278-4938

AuthorID (RSCI): 690443

Correspondence address: kimkk@inbox.ru

**TKACHUK Anton Andreyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electrical Engineering and Heat Power Engineering Department, PGUPS, Saint Petersburg.

SPIN-code: 7335-2340

AuthorID (RSCI): 726854

Correspondence address: a.a.tkachuk@mail.ru

**KUZNETSOV Andrey Albertovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Omsk.

SPIN-code: 5259-0531

AuthorID (RSCI): 358976

Correspondence address: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

#### For citations

Koroleva E. B., Kurmashev S. M., Kim K. K., Tkachuk A. A., Kuznetsov A. A. Devices for express diagnostics of power semiconductor devices and semiconductor converters // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-119-125.

Received February 10, 2023.

© E. B. Koroleva, S. M. Kurmashev, K. K. Kim,

A. A. Tkachuk, A. A. Kuznetsov

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В КОНТАКТНЫХ СИСТЕМАХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

**В статье проведено исследование зависимостей величины потерь активной мощности в контактах и контактных системах автоматических выключателей, контакторов и магнитных пускателей от основных параметров электрооборудования. Разработаны модели функциональных зависимостей активных потерь от номинального тока для низковольтных коммутационных аппаратов некоторых заводов-изготовителей. Составлены аппроксимирующие функции данных характеристик и рассчитаны величина коэффициента детерминации полученных функций активных потерь и ошибка аппроксимации. Представлены графические зависимости исследуемых параметров низковольтной аппаратуры.**

**Ключевые слова:** низковольтные коммутационные аппараты, контактные соединения, потери мощности, аппроксимирующие функции, конструктивные особенности.

**Введение.** В настоящее время низковольтное аппаратостроение во всем мире интенсивно развивается. Разрабатываются новые материалы и конструкции аппаратов, усложняются выполняемые ими функции. Предъявляются более жесткие требования к низковольтным коммутационным аппаратам (НКА), они должны обладать достаточным уровнем надежности и эффективно функционировать на протяжении всего срока эксплуатации [1, 2]. При этом НКА являются одними из основных элементов систем управления электроприводов и систем управления электрическими машинами [3]. Для правильного выбора типа и номинальных параметров НКА необходимо иметь достоверную информацию о величине расчетных нагрузок объектов электропотребления [4, 5].

Как известно, линии сетей внутрицехового электроснабжения содержат множество контактов и контактных соединений НКА. Для анализа и оценки потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях низкого напряжения необходимы данные о величине потерь в контактных соединениях НКА [6, 7].

Основными факторами, определяющими потери активной мощности в НКА, являются: величина номинального тока; геометрическая форма и площадь соприкосновения контактов; частота коммутаций аппарата; материал контактов: их форма и однородность структуры; сечения токопроводящих частей аппарата и среда эксплуатации электрооборудования.

На данном этапе развития электроэнергетики изменяются требования к учету потерь мощности и электроэнергии во внутрицеховых системах электроснабжения. При этом получение достоверной информации связано со сложностью определе-

ния параметрических и режимных данных систем электроснабжения. Достоверность информации о параметрах электрооборудования значительно повышает возможность принятия решений для увеличения энергоэффективности эксплуатации систем электроснабжения [8].

**Постановка задачи.** Для современных условий развития электротехнической промышленности характерным является увеличение номенклатуры выпускаемых НКА. Активно ведутся разработки по созданию как отечественных, так и зарубежных НКА. Исследуются новые конструкции аппаратов с дополнительными функциональными возможностями [2]. Так, например, современные автоматические выключатели в литом корпусе (АВАК) могут выполнять коммутационные операции без вмешательства оперативного персонала, т.е. работать в сочетании с программируемым логическим контроллером [9].

Проведем анализ и исследование технических параметров автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов, которые наиболее распространены на отечественных промышленных предприятиях. Для исследования отобраны аппараты Курского электроаппаратного завода (КЭАЗ) и ряда зарубежных фирм-производителей (Schneider Electric, ABB, Legrand).

Большинство НКА предназначены для работы при длительном замкнутом состоянии контактов, поэтому необходимо, чтобы аппараты функционировали со стабильным значением переходного сопротивления контактных групп.

Как правило, в технической литературе не предоставляется информация о потерях мощности большинства НКА, в связи с этим возникает необходимость в исследовании законов изменения

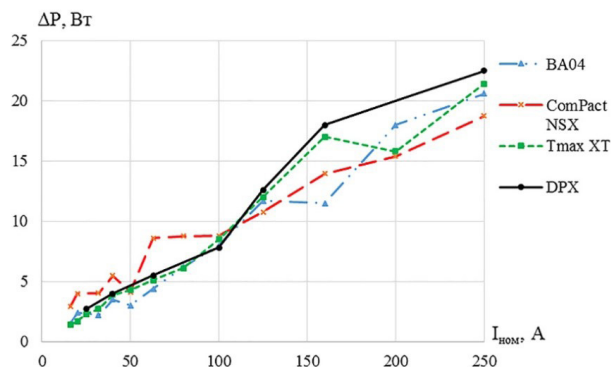


Рис. 1. Графические зависимости потерь активной мощности от номинального тока АВЛК различных заводов-изготовителей

потерь мощности в контактах и контактных соединениях различных групп аппаратов.

В зависимости от номинального тока аппарата его потери мощности будут различными. По каталожным данным НКА исследуем зависимость потерь мощности  $\Delta P$  от номинального тока  $I_n$  для АВЛК (рис. 1), магнитных пускателей и контакторов (рис. 2) различных заводов-изготовителей.

Анализ данных (рис. 1) показывает, что основные технические параметры АВЛК заводов-изготовителей КЭАЗ, Schneider Electric, ABB и Legrand имеют близкие значения, однако имеются отличия в значениях потерь активной мощности на полюс.

На основании статистических данных отказов магнитных пускателей выявлено, что наиболее слабым элементом являются его силовые контакты [10]. При сравнении характеристик отечественных и зарубежных магнитных пускателей установлены сходства в технических параметрах. Так, для пускателей марок ПМЛ (КЭАЗ), КМИ (ИЕК) и EasyPact TVS (Schneider Electric) характерны одинаковые значения потерь активной мощности в силовых контактах.

**Результаты экспериментов.** Произведем аппроксимацию построенных функций для нахождения

зависимостей потерь мощности от номинального тока [11, 12]. Для исследуемых функций определим коэффициент детерминации  $R^2$  и среднюю ошибку аппроксимации  $\bar{A}$ .

Аппроксимацией называют замену одних математических объектов другими, близкими к исходным:

$$\Delta P = F(I_n), \quad (1)$$

где  $F(I_n)$  — функциональные зависимости значений потерь активной мощности от величины номинального тока;  $I_n$  — номинальный ток.

Коэффициент детерминации  $R^2$  является статистической мерой согласия, с помощью которой можно определить, насколько модель регрессии соответствует данным, по которым она построена. Коэффициент  $R^2$  соответствует значениям диапазона от 0 до 1 [13].

$R^2$  вычисляется по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

где  $y_i$  — фактические значения переменных;

$\hat{y}$  — расчетные значения исследуемой величины;

$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{n}$  — среднее значение исследуемой величины;

$\sum_i (y_i - \hat{y})^2$  — сумма квадратов ошибок регрессии;

$\sum_i (y_i - \bar{y})^2$  — сумма квадратов отклонений точек данных от среднего значения.

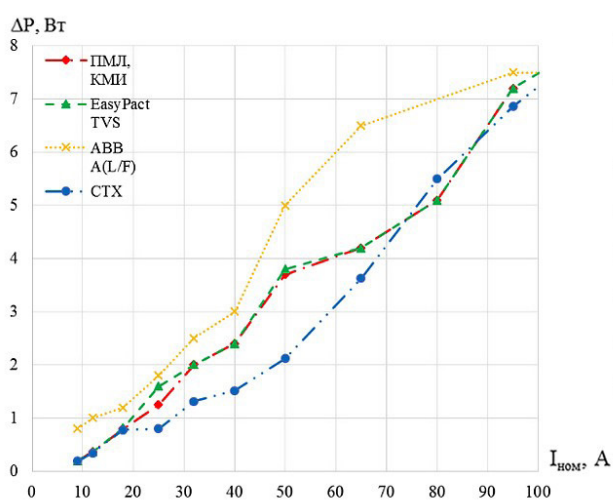
Исследуем параметры АВЛК ВА04 (КЭАЗ). При этом получены аппроксимирующие функции, которые представлены следующими выражениями:

— экспоненциальная

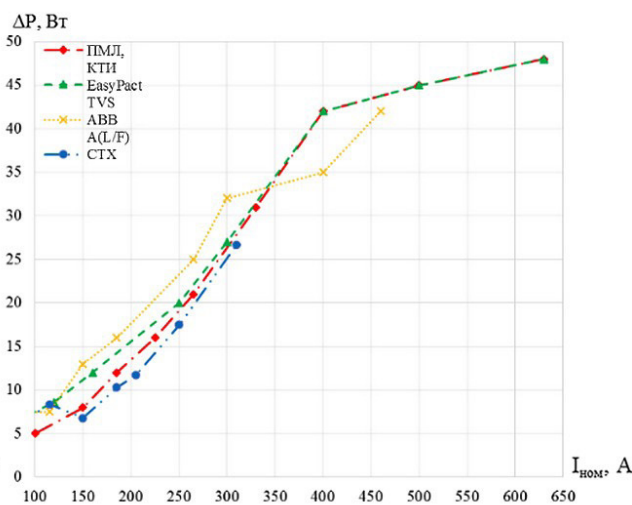
$$\Delta P_{BA1} = 1,9379e^{(0,0112 \cdot I_n)} \quad (3)$$

— линейная

$$\Delta P_{BA2} = 0,0869 \cdot I_n - 0,3237 \quad (4)$$



а)



б)

Рис. 2. Графические зависимости потерь активной мощности от номинального тока для: а — магнитных пускателей; б — контакторов

Результаты расчета коэффициента детерминации для полиномиальной функции

$y_i$	$\hat{y}$	$\bar{y}$	$(y_i - \hat{y})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$\sum (y_i - \hat{y})^2$	$\sum (y_i - \bar{y})^2$	$R^2$	$\bar{A}, \%$
1,5	1,48	7,44	0,0003	35,265	8,59	515,11	0,9833	11,45
2,4	1,76		0,4051	25,381				
2,4	2,13		0,0795	25,381				
2,2	2,62		0,1773	27,437				
3,5	3,2		0,0867	15,508				
3	3,95		0,9035	19,696				
4,4	4,94		0,2948	9,229				
6,2	6,28		0,0066	1,533				
8	7,92		0,0071	0,316				
11,7	10,05		2,7291	18,165				
11,5	13,2		2,8951	16,500				
18	17,04		0,9111	111,55				
21,9	22,21		0,0964	209,15				

Таблица 2

Аппроксимирующие функции потерь мощности для исследуемых АВЛК

Аппроксимирующая функция		$R^2$	$\bar{A}, \%$
ВА04 (КЭАЗ)			
экспоненциальная	$\Delta P_{BA1} = 1,9379e^{(0,0112 \cdot I_n)}$	0,7629	19,65
линейная	$\Delta P_{BA2} = 0,0869 \cdot I_n - 0,3237$	0,9798	16,36
логарифмическая	$\Delta P_{BA3} = 6,6325 \cdot \ln(I_n) - 20,065$	0,8207	55,9
<b>полиномиальная</b>	$\Delta P_{BA4} = -8 \cdot 10^{-5} \cdot I_n^2 + 0,0673 \cdot I_n + 0,3855$	<b>0,9833</b>	<b>11,45</b>
степенная	$\Delta P_{BA5} = 0,1014 \cdot I_n^{(0,9518)}$	0,9639	10,4
ComPact NSX (Schneider Electric)			
экспоненциальная	$\Delta P_{NSX1} = 3,6152e^{(0,0076 \cdot I_n)}$	0,8286	18,3
линейная	$\Delta P_{NSX2} = 0,0668 \cdot I_n + 2,4667$	0,9690	10,71
логарифмическая	$\Delta P_{NSX3} = 5,3394 \cdot \ln(I_n) - 13,71$	0,8908	22,73
<b>полиномиальная</b>	$\Delta P_{NSX4} = -6 \cdot 10^{-5} \cdot I_n^2 + 0,082 \cdot I_n + 1,928$	<b>0,9724</b>	<b>10,17</b>
степенная	$\Delta P_{NSX5} = 0,4648 \cdot I_n^{(0,6584)}$	0,9673	10,4
Tmax XT (ABB)			
экспоненциальная	$\Delta P_{Tmax1} = 2,0861e^{(0,0107 \cdot I_n)}$	0,4659	32,27
линейная	$\Delta P_{Tmax2} = 0,0761 \cdot I_n + 0,6608$	0,9317	13,89
логарифмическая	$\Delta P_{Tmax3} = 6,1907 \cdot \ln(I_n) - 18,209$	0,8857	39,42
<b>полиномиальная</b>	$\Delta P_{Tmax4} = -2 \cdot 10^{-4} \cdot I_n^2 + 0,1209 \cdot I_n - 0,9538$	<b>0,9541</b>	<b>13,27</b>
степенная	$\Delta P_{DPX1} = 2,692e^{(0,0099 \cdot I_n)}$	0,9313	8,45
DPX (Legrand)			
экспоненциальная	$\Delta P_{DPX1} = 2,692e^{(0,0099 \cdot I_n)}$	0,6643	19,54
линейная	$\Delta P_{DPX2} = 0,0924 \cdot I_n + 0,4753$	0,9646	12,34
логарифмическая	$\Delta P_{DPX3} = 7,16 \cdot \ln(I_n) - 20,82$	0,8263	43,70
<b>полиномиальная</b>	$\Delta P_{DPX4} = -5 \cdot 10^{-5} \cdot I_n^2 + 0,1044 \cdot I_n + 0,0142$	<b>0,9659</b>	<b>13,53</b>
степенная	$\Delta P_{DPX5} = 0,1949 \cdot I_n^{(0,8492)}$	0,9485	15,37

— логарифмическая

$$\Delta P_{\text{BA3}} = 6,6325 \cdot \ln(I_{\text{H}}) - 20,065 \quad (5)$$

— полиномиальная

$$\Delta P_{\text{BA4}} = -8 \cdot 10^{-5} \cdot I_{\text{H}}^2 + 0,0673 \cdot I_{\text{H}} + 0,3855 \quad (6)$$

— степенная

$$\Delta P_{\text{BA5}} = 0,1014 \cdot I_{\text{H}}^{(0,9518)} \quad (7)$$

Вычислим коэффициент детерминации по выражению (2) для полиномиальной функции:

$$R^2 = 1 - \frac{(1,5 - 1,48)^2 + \dots + (21,9 - 22,21)^2}{(1,5 - 7,438)^2 + \dots + (21,9 - 7,438)^2} = 1 - \frac{8,59}{515,11} = 0,9833$$

Как известно, чем ближе значение коэффициента к 1, тем существеннее зависимость и точнее функция аппроксимации.

Далее вычислим среднюю ошибку аппроксимации:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{y_i - \hat{y}}{y_i} \right| \cdot 100 \% \quad (8)$$

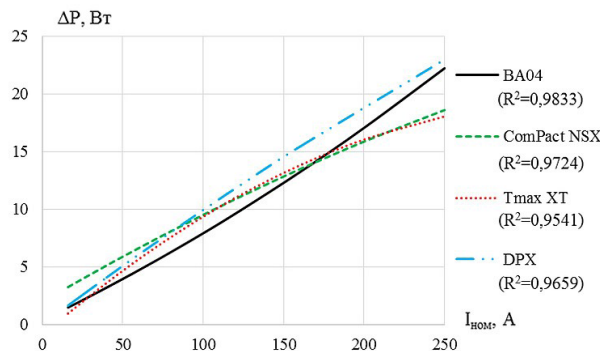


Рис. 3. Графики аппроксимирующих функций потерь активной мощности для АВЛК

$$\bar{A} = \frac{1}{13} \left( \frac{1,5 - 1,48}{1,5} + \dots + \frac{21,9 - 22,21}{21,9} \right) \cdot 100\% = 11,45\%$$

Ошибка составила менее 15%, что свидетельствует о достаточно высокой точности аппроксимации. Результаты расчета показаны в табл. 1.

В табл. 2 приведены аппроксимирующие функции для исследуемых АВЛК, их коэффициент детерминации и ошибка аппроксимации

Таблица 3

Аппроксимирующие функции потерь мощности для магнитных пускателей различных заводов-изготовителей

Аппроксимирующая функция		$R^2$	$\bar{A}$ , %
ПМЛ (КЭАЗ); КМИ (IEK); EasyPact TVS (Schneider Electric)			
экспоненциальная	$\Delta P_{\text{ПМЛ1}} = 0,3607e^{(0,0363 \cdot I_{\text{H}})}$	0,504	46,08
линейная	$\Delta P_{\text{ПМЛ2}} = 0,0773 \cdot I_{\text{H}} - 0,5701$	0,9848	9,26
логарифмическая	$\Delta P_{\text{ПМЛ3}} = 2,697 \cdot \ln(I_{\text{H}}) - 6,7099$	0,8814	78,93
<b>полиномиальная</b>	$\Delta P_{\text{ПМЛ4}} = 9 \cdot 10^{-5} \cdot I_{\text{H}}^2 + 0,0679 \cdot I_{\text{H}} - 0,4125$	<b>0,9856</b>	<b>7,23</b>
степенная	$\Delta P_{\text{ПМЛ5}} = 0,0101 \cdot I_{\text{H}}^{(1,4646)}$	0,9483	13,87
ABB A (ABB)			
экспоненциальная	$\Delta P_{\text{ABB1}} = 0,853e^{(0,0272 \cdot I_{\text{H}})}$	0,67	22,58
линейная	$\Delta P_{\text{ABB2}} = 0,0877 \cdot I_{\text{H}} - 0,1078$	0,964	11,94
логарифмическая	$\Delta P_{\text{ABB3}} = 3,1114 \cdot \ln(I_{\text{H}}) - 7,2501$	0,89	41,45
<b>полиномиальная</b>	$\Delta P_{\text{ABB4}} = -3 \cdot 10^{-4} \cdot I_{\text{H}}^2 + 0,121 \cdot I_{\text{H}} - 0,666$	<b>0,9717</b>	<b>17,5</b>
степенная	$\Delta P_{\text{ABB5}} = 0,0703 \cdot I_{\text{H}}^{(1,0452)}$	0,962	11
CTX (Legrand)			
экспоненциальная	$\Delta P_{\text{CTX1}} = 0,2751e^{(0,0377 \cdot I_{\text{H}})}$	0,7942	29,36
линейная	$\Delta P_{\text{CTX2}} = 0,0762 \cdot I_{\text{H}} - 0,9405$	0,9576	52
логарифмическая	$\Delta P_{\text{CTX3}} = 2,5181 \cdot \ln(I_{\text{H}}) - 6,5$	0,7683	114
<b>полиномиальная</b>	$\Delta P_{\text{CTX4}} = 6 \cdot 10^{-4} \cdot I_{\text{H}}^2 + 0,0135 \cdot I_{\text{H}} + 0,112$	<b>0,9925</b>	<b>12,48</b>
степенная	$\Delta P_{\text{CTX5}} = 0,0088 \cdot I_{\text{H}}^{(1,4428)}$	0,98	11,45

Аппроксимирующие функции потерь мощности для контакторов различных заводов-изготовителей

Аппроксимирующая функция		$R^2$	$\bar{A}$ , %
ПМЛ (КЭАЗ); КТИ (IEK); EasyPact TVS (Schneider Electric)			
экспоненциальная	$\Delta P_{\text{ПМЛ6}} = 5,5e^{(0,0042 \cdot I_n)}$	0,4058	28,03
линейная	$\Delta P_{\text{ПМЛ7}} = 0,0922 \cdot I_n - 2,9528$	0,9299	15,05
логарифмическая	$\Delta P_{\text{ПМЛ8}} = 27,167 \cdot \ln(I_n) - 126,6$	0,9389	25
<b>полиномиальная</b>	$\Delta P_{\text{ПМЛ9}} = -1 \cdot 10^{(-4)} \cdot I_n^2 + 0,1799 \cdot I_n - 15,52$	<b>0,9725</b>	<b>14,8</b>
степенная	$\Delta P_{\text{ПМЛ10}} = 0,0105 \cdot I_n^{(1,3517)}$	0,843	11,1
ABB A (ABB)			
экспоненциальная	$\Delta P_{\text{ABB6}} = 6,2703e^{(0,0045 \cdot I_n)}$	0,8278	17,82
линейная	$\Delta P_{\text{ABB7}} = 0,0969 \cdot I_n - 1,604$	0,9676	8,02
логарифмическая	$\Delta P_{\text{ABB8}} = 24,528 \cdot \ln(I_n) - 110,13$	0,9797	7,66
<b>полиномиальная</b>	$\Delta P_{\text{ABB9}} = -1 \cdot 10^{(-4)} \cdot I_n^2 + 0,178 \cdot I_n - 10,411$	<b>0,9835</b>	<b>4,7</b>
степенная	$\Delta P_{\text{ABB10}} = 0,0304 \cdot I_n^{(1,1926)}$	0,9461	9,54
CTX (Legrand)			
экспоненциальная	$\Delta P_{\text{CTX6}} = 3,0389e^{(0,0068 \cdot I_n)}$	0,9683	10,7
линейная	$\Delta P_{\text{CTX7}} = 0,1003 \cdot I_n - 6,7492$	0,8979	18,5
логарифмическая	$\Delta P_{\text{CTX8}} = 18,56 \cdot \ln(I_n) - 84,04$	0,7873	25,92
<b>полиномиальная</b>	$\Delta P_{\text{CTX9}} = 5 \cdot 10^{(-4)} \cdot I_n^2 + 0,1204 \cdot I_n + 14,614$	<b>0,9887</b>	<b>6,2</b>
степенная	$\Delta P_{\text{CTX10}} = 0,0137 \cdot I_n^{(1,2911)}$	0,8898	16,34

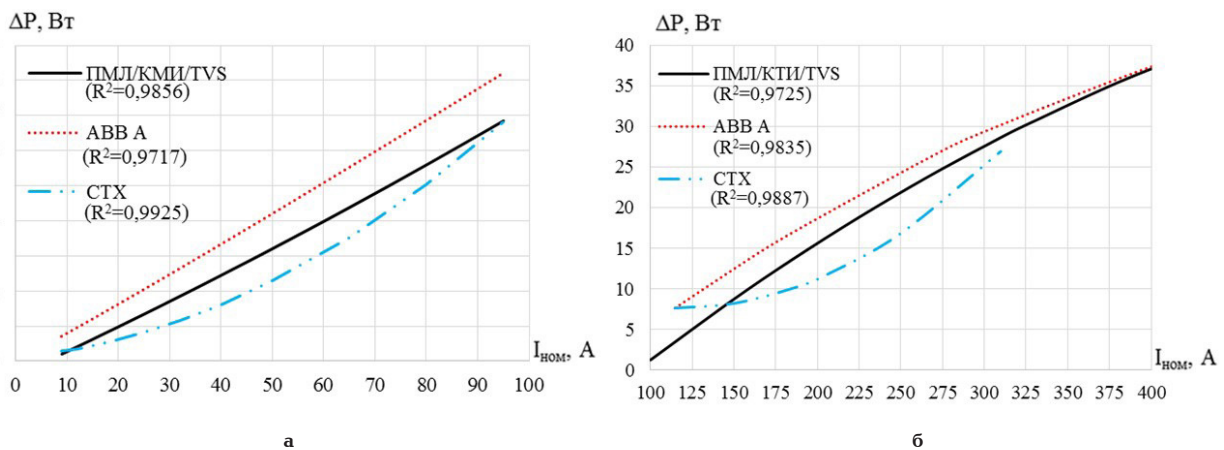


Рис. 4. Графики аппроксимирующих функций потерь активной мощности для: а — магнитных пускателей; б — контакторов

Данные (табл. 2) показывают, что наибольшая точность аппроксимирующих выражений для параметров, исследуемых АВЛК, характерна для полиномиальных функций зависимости  $\Delta P = F(I_n)$ , а наименее достоверно исследуемые параметры описывают экспоненциальные функции.

Таким образом, определены функциональные зависимости изменения потерь мощности на полюс от номинального тока — аппроксимирующие функции, имеющие наибольшие значения коэффициентов детерминации и наименьшие значения ошибок

аппроксимации. Для АВЛК, работающих с коэффициентом загрузки  $K_3 = 1$ , исследуемые зависимости имеют вид, представленный на рис. 3.

Далее исследуем технические характеристики магнитных пускателей марок ПМЛ (КЭАЗ), КМИ (IEK), EasyPact TVS (Schneider Electric), ABB A (ABB), CTX (Legrand); результаты представлены в табл. 3.

Результаты исследований (табл. 3 и 4) показывают, что наиболее точно зависимости потерь мощности от номинального тока магнитных пускателей и контакторов описывают полиномиальные выра-

жения, а наименее достоверными являются экспоненциальные и логарифмические функции.

В табл. 4 представлены аппроксимирующие функции потерь мощности для исследуемых контакторов марок ПМА (КЭАЗ), КТИ (IEK), EasyPact TVS (Schneider Electric), ABB A (ABB), CTX (Legrand).

Аппроксимирующие функции исследуемых магнитных пускателей и контакторов при  $K_3 = 1$  с наибольшими коэффициентами детерминации представлены на рис. 4.

**Заключение.** В представленной статье проведено исследование зависимостей величины потерь активной мощности в автоматических выключателях, магнитных пускателях и контакторах от основных параметров оборудования. Сравнительный анализ технических характеристик автоматических выключателей ВА04, ComPact NSX, DPX, Tmax XT показал, что имеются различия в величинах потерь активной мощности на полюс аппарата.

Потери активной мощности в контактных системах магнитных пускателей и контакторов марок ПМА, КМИ/КТИ и EasyPact TVS совпадают.

Для исследуемых автоматических выключателей заводов-производителей низковольтной аппаратуры — КЭАЗ, Schneider Electric, Legrand и ABB в соответствии с каталожными данными разработаны функциональные зависимости активных потерь в контактных системах аппаратов от номинального тока. Аналогичные зависимости разработаны для магнитных пускателей и контакторов фирм — КЭАЗ, IEK, Schneider Electric, Legrand и ABB. Смоделированы зависимости изменения потерь мощности в контактах и контактных системах автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов от номинального тока — аппроксимирующие функции, имеющие наибольшие коэффициенты детерминации и наименьшие ошибки аппроксимации.

Разработанные модели могут быть рекомендованы для уточнения величины потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения.

#### Библиографический список

1. Грачева Е. И., Горлов А. И., Алимова А. Н. Алгоритмы и модели потерь мощности в автоматических выключателях, устанавливаемых в цеховых сетях // Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 4. С. 345–353. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-345-353.
2. Грачева Е. И., Горлов А. И., Алимова А. Н. [и др.]. Определение законов изменения сопротивления контактных групп электрических аппаратов низкого напряжения // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 4. С. 350–360. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-4-350-360.
3. Сафин А. Р., Хуснутдинов Р. Р., Копылов А. М. [и др.]. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // Вестник КГЭУ. 2018. № 4 (40). С. 77–85.
4. Солянов Ю. И., Федотов А. И., Галицкий Ю. Я. [и др.]. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // Электричество. 2021. № 6. С. 62–71. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71.
5. Солянов Ю. И., Федотов А. И., Ахметшин А. Р. [и др.]. Анализ фактических электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 6. С. 134–147. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-134-147.
6. Егоров Е. Г., Иванова С. П., Луия Н. Ю. [и др.]. Исследование отключающей способности автоматических выключателей в режиме короткого замыкания // Электротехника. 2018. № 8. С. 12–15.
7. Егоров Е. Г., Егоров Г. Е., Луия Н. Ю. Особенности измерения восстанавливающейся электрической прочности в низковольтных контакторах переменного тока // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 78–86.
8. Муратаева Г. А., Муратаев И. А., Сабитов С. Е. [и др.]. Метод оптимизации режима электрической сети для снижения потерь мощности // Вестник современных исследований. 2018. № 5.1 (20). С. 476–479.
9. Hnatiuc B., Borta M., Hnatiuc M. Switching Transient Regime of Shunts Release from a Low Voltage Circuit Breaker Commanded by a PLC // 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIEMEN), Craiova, Romania. 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/SIEMEN.2019.8905865.
10. Буторин В. А., Царев И. Б., Банин Р. В. [и др.]. Время первой проверки состояния контактов магнитного пускателя // Вестник Курганской ГСХА. 2019. № 2 (30). С. 58–60.
11. Feizifar B., Usta Ö. A new failure protection algorithm for circuit breakers using the power loss of switching arc incidents // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2019. № 27 (3). P. 1982–1997. DOI: 10.3906/elk-1805-84.
12. Lei C., Tian W., Zhang Y. [et al.]. Probability-based circuit breaker modeling for power system fault analysis // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA. 2017. P. 979–984. DOI: 10.1109/apec.2017.7930815.
13. Доугерти К. Введение в эконометрику. Москва: ИНФРА-М, 2009. 465 с.

**ПЕТРОВ Алмаз Радикович**, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Института электроэнергетики и электроники Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань.

Адрес для переписки: petroval13@mail.ru

**ГРАЧЕВА Елена Ивановна**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Института электроэнергетики и электроники КГЭУ, г. Казань.

SPIN-код: 2676-5593

AuthorID (РИНЦ): 692465

ORCID: 0000-0002-5379-847X

AuthorID (SCOPUS): 57211789327

Адрес для переписки: grachieva.i@bk.ru

#### Для цитирования

Петров А. Р., Грачева Е. И. Моделирование потерь мощности в контактных системах низковольтных коммутационных аппаратов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 126–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-126-133.

Статья поступила в редакцию 08.02.2023 г.

© А. Р. Петров, Е. И. Грачева

## MODELING OF POWER LOSSES IN CONTACT SYSTEMS OF LOW-VOLTAGE SWITCHING DEVICES

The article studies the dependences of active power losses in contacts and contact systems of circuit breakers, contactors and magnetic starters on the main parameters of electrical equipment. Models of functional dependences of active power losses on nominal current for low-voltage switching devices of some manufacturers are developed. Approximation functions of these characteristics have been compiled and the value of determination coefficient of the obtained functions of active losses and approximation error have been calculated. Graphical dependences of the investigated parameters of low-voltage equipment are presented.

**Keywords:** low-voltage switching devices, contact connections, power losses, approximating functions, design features.

### References

1. Gracheva E. I., Gorlov A. N., Alimova A. N. Algoritmy i modeli poter' moshchnosti v avtomaticheskikh vyklyuchatelyakh, ustanavlivayemykh v tsekhovykh setyakh [Algorithms and models of power losses in circuit breakers installed in networks] // Vestnik MGTU. *Vestnik of MSTU*. 2020. Vol. 23, no. 4. P. 345–353. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-345-353. (In Russ.).
2. Gracheva E. I., Gorlov A. N., Alimova A. N. [et al.]. Opredeleniye zakonov izmeneniya soprotivleniya kontaktnykh grupp elektricheskikh apparatov nizkogo napryazheniya [Resistance change of contact groups of low-voltage electrical apparatus: Determining the laws] // Vestnik MGTU. *Vestnik of MSTU*. 2021. Vol. 24, no. 4. P. 350–360. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-4-350-360. (In Russ.).
3. Safin A. R., Khusnutdinov R. R., Kopylov A. M. [et al.]. Razrabotka metoda topologicheskoy optimizatsii elektricheskikh mashin na osnove geneticheskogo algoritma [Model of the control system rocking machines of oil the basic of a synchronous engines with the sensorless method] // Vestnik KGEU. *Vestnik KGEU*. 2018. No. 4 (40). P. 77–85. (In Russ.).
4. Soluyanov Yu. I., Fedotov A. I., Galitskiy Yu. Ya. [et al.]. Aktualizatsiya normativnykh znacheniy udel'noy elektricheskoy nagruzki mnogokvartirnykh domov v Respublike Tatarstan [Updating the Standard Specific Electric Loads of Apartment Buildings in the Republic of Tatarstan] // Elektrichestvo. *Elektrichestvo*. 2021. No. 6. P. 62–71. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71. (In Russ.).
5. Soluyanov Yu. I., Fedotov A. I., Akhmetshin A. R. [et al.]. Analiz fakticheskikh elektricheskikh nagruzok pomeshcheniy obshchestvennogo naznacheniya, vstroyennykh v zhilyye zdaniya [Analysis of the actual electrical loads of public premises embedded in residential buildings] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021. Vol. 23, no. 6. P. 134–147. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-134-147. (In Russ.).
6. Egorov E. G., Ivanova S. P., Luiya N. Yu. [et al.]. Issledovaniye otklyuchayushchey sposobnosti avtomaticheskikh vyklyuchateley v rezhime korotkogo zamykaniya [Investigation of the breaking capacity of the automatic circuit-breakers in the short-circuit mode] // Elektrotehnika. *Electrical Engineering*. 2018. No. 8. P. 12–15. (In Russ.).
7. Egorov E. G., Egorov G. E., Luiya N. Yu. Osobennosti izmereniya vosstanavlivayushchey elektricheskoy prochnosti v nizkovol'tnykh kontaktorakh peremennogo toka [Features of measurement of recoverable electrical strength in low-voltage ac contactors] // Vestnik Chuvashskogo universiteta. *Bulletin of the Chuvash University*. 2019. No. 3. P. 78–86. (In Russ.).
8. Muratayeva G. A., Muratayev I. A., Sabitov S. E. [et al.]. Metod optimizatsii rezhima elektricheskoy seti dlya snizheniya poter' moshchnosti [Method for optimising grid operation to reduce power losses] // Vestnik sovremennykh issledovaniy. *Bulletin of Modern Research*. 2018. No. 5.1 (20). P. 476–479. (In Russ.).
9. Hnatiuc B., Borta M., Hnatiuc M. Switching Transient Regime of Shunts Release from a Low Voltage Circuit Breaker Commanded by a PLC // 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania. 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/SIELMEN.2019.8905865. (In Engl.).
10. Butorin V. A., Tsarev I. B., Banin R. V. [et al.]. Vremya pervoy proverki sostoyaniya kontaktov magnitnogo puskatelya [Time of first check of condition contact magnetic pusher] // Vestnik Kurganskoy GSKHA. *Bulletin of KSAA*. 2019. No. 2 (30). P. 58–60. (In Russ.).
11. Feizifar B., Usta Ö. A new failure protection algorithm for circuit breakers using the power loss of switching arc incidents // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2019. No. 27 (3). P. 1982–1997. DOI: 10.3906/elk-1805-84. (In Engl.).
12. Lei C., Tian W., Zhang Y. [et al.]. Probability-based circuit breaker modeling for power system fault analysis // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA. 2017. P. 979–984. DOI: 10.1109/apec.2017.7930815. (In Engl.).
13. Dougerti K. Vvedeniye v ekonometriku [Introduction to econometrics]. Moscow, 2009. 465 p. (In Russ.).

---

**PETROV Almaz Radikovich**, Graduate Student of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Institute of Electric Power and Electronics, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan.

Correspondence address: petroval13@mail.ru

**GRACHEVA Elena Ivanovna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Institute of Electric Power and Electronics, KSPEU, Kazan.

SPIN-code: 2676-5593

AuthorID (RSCI): 692465

ORCID: 0000-0002-5379-847X

AuthorID (SCOPUS): 57211789327

Correspondence address: gracheva.i@bk.ru

#### For citations

Petrov A. R., Gracheva E. I. Modeling of power losses in contact systems of low-voltage switching devices // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 126–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-126-133.

Received February 08, 2023.

© A. R. Petrov, E. I. Gracheva



# ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.317.328

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-134-139

С. В. БИРЮКОВ

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОГО ДИСКОВОГО ДАТЧИКА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Задачи, связанные с защитой биологических и технических объектов от воздействия электрических, являются актуальными. Одна из таких задач связана с разработкой датчиков напряженности электрического поля с заданными метрологическими характеристиками. Целью исследования является минимизация погрешности известного датчика и расширения его пространственного диапазона измерений за счет рационального выбора чувствительных элементов. Предложенный в работе датчик имеет отрицательную погрешность  $\delta$  от неоднородности поля по модулю, не превышающую 3 % в пространственном диапазоне измерения  $0 \leq r \leq R$ , где  $R$  — радиус дискового основания датчика. Для обеспечения требуемых метрологических характеристик датчика были подобраны рациональные размеры его чувствительных элементов. При этом рациональный радиус  $r$  чувствительных элементов, выполненных в форме круга, должен удовлетворять условию  $r < R$ , т.е. должен быть меньше радиуса  $R$  дискового основания датчика. При выполнении этого условия меньшему радиусу  $r$  чувствительного элемента будет соответствовать меньшая погрешность  $\delta$  от неоднородности поля и больший пространственный диапазон измерения. В сравнении с известными датчиками, при одинаковой погрешности, предложенный датчик имеет пространственный диапазон измерения примерно в пять раз больше. Такой подход к выбору чувствительных элементов позволяет проектировать датчики с лучшими метрологическими характеристиками.

**Ключевые слова:** электрическое поле, однородное поле, неоднородное поле, точечный источник, напряженность, дисковый датчик, погрешность от неоднородности поля, электрометрические измерения.

**Введение.** Электрические поля (ЭП) низкочастотного диапазона (10 Гц ... 1 МГц) оказывают негативное влияние на работу технических устройств и на функционирование биологических систем, в частности человека. Основным негативным фак-

тором низкочастотного ЭП является его напряженность. Источниками низкочастотного ЭП, в зону которых попадают человек, животные и природная среда, являются высоковольтные линии электропередач (ЛЭП), трансформаторные подстанции (ПС),

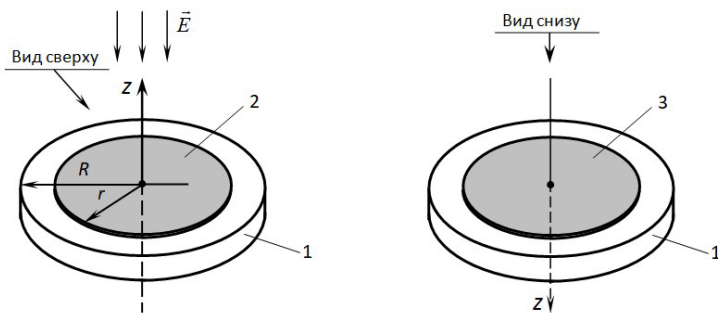


Рис. 1. Датчик напряженности электрического поля с проводящей подложкой в форме круглой пластины с чувствительными элементами радиуса  $r < R$  в однородном поле

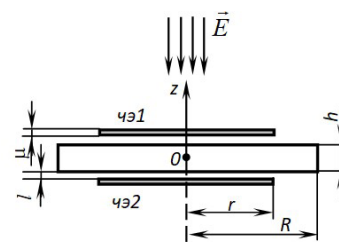


Рис. 2. Конструктивные параметры датчика и его взаимодействие с ЭП

кабельные линии и низковольтные бытовые приборы и электронная техника.

Одним из способов средств защиты от воздействия ЭП — это выявление зон повышенной напряженности и исключение присутствия человека без специальных средств защиты в этих зонах. Для выявления опасных для жизнедеятельности человека зон с повышенной напряженностью необходимы средства контроля и измерения уровней напряженности ЭП. Основной составляющей этих средств являются датчики напряженности ЭП.

Разработка таких датчиков и средств измерений на их основе ведется в России [1–5] и за рубежом [6–10]. Данная работа не является исключением. В работе исследуется однокоординатный электроиндукционный планарный датчик напряженности ЭП. Датчик выполнен в форме проводящего диска с круговыми чувствительными элементами, радиус которых меньше радиуса диска. Ранее автором в работах [11, 12] проведены теоретические исследования работы дискового датчика напряженности низкочастотного ЭП с чувствительными элементами, имеющими радиус, равный радиусу диска. В результате исследований были получены математические выражения для выходного сигнала датчика, его погрешности и пространственный диапазон измерения, в пределах которого поддерживается его погрешность. Показано, что погрешность датчика от неоднородности поля отрицательная и составляет  $\delta = -3\%$ .

С такой погрешностью датчик будет измерять напряженность ЭП на расстояниях от источника поля  $d = 5R$ , где  $R$  — радиус проводящего диска датчика.

В работе [11] отмечается простота технической реализации и малые габариты датчика, позволяющие встраивать датчик в измерительный прибор. Недостатком датчика является малый пространственный диапазон измерения при заданной погрешности. Поэтому данный датчик требует улучшения метрологических характеристик, приводящих к расширению пространственного диапазона измерения при малой погрешности, вызванной неоднородностью реальных ЭП. Улучшение метрологических характеристик этого датчика будет являться целью данной работы.

**Постановка задачи.** Чтобы достичь поставленных целей, требуется решить ряд задач:

1) установить взаимосвязи между размерами чувствительных элементов датчика, размером его дискового основания и пространственным диапазоном измерения;

2) установить взаимосвязь погрешности датчика от размеров его чувствительных элементов;

3) провести оптимизацию размеров чувствительных элементов датчика, при которых его погрешность будет минимальной в максимальном возможном пространственном диапазоне измерения.

**Теория.** В основе теории работы датчика лежат его конструктивные и математические модели.

*Конструктивная модель датчика* состоит из проводящего диска 1 радиуса  $R$ , на основаниях которого расположены изолированно от него проводящие чувствительные элементы 2 и 3, как показано на рис. 1.

Проводящее основание датчика имеет толщину  $h$  ( $h \ll R$ ), много меньшую радиуса  $R$  диска. Чувствительные элементы и изоляционные слои наносятся на поверхность диска методом напыления. Чувствительные элементы имеют круглую форму радиуса  $r < R$  и толщину  $\mu < 100$  мкм, а изоляционные слои имеют толщину  $k < 50$  мкм (рис. 2).

Малые толщины чувствительных элементов  $\mu \ll h$  и изоляционных слоёв  $k \ll h$ , позволяют считать чувствительные элементы неотъемлемой частью проводящего диска с потенциалами, равными потенциалам диска. В этом случае датчик представляет единый проводящий диск. Описанная конструктивная модель датчика защищена авторским правом [13].

*Математическую модель датчика* составим на основании теории его взаимодействия с однородным полем свободного пространства и неоднородным полем вблизи источника. Однородное поле свободного пространства будем рассматривать как эталонное. Оно будет служить эталоном при оценке погрешности датчика, работающего в неоднородном поле.

Воспользовавшись датчиком, представленным на рис. 1, и его конструктивными параметрами, указанными на рис. 2, проведем теоретические исследования взаимодействия датчика с ЭП различной неоднородности. В качестве источника неоднородного ЭП выберем поле точечного заряда, поле которого убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до исследуемой точки поля. С помощью такого поля можно смоделировать поля с различной степенью неоднородности.

Рассмотрим взаимодействие датчика напряженности с однородным и неоднородным ЭП.

**Датчик в однородном поле.** Поместим проводящий диск в однородное поле (рис. 1) так, чтобы силовые линии поля были перпендикулярно его поверхности. При этом на двух противоположных основаниях диска будут индуцироваться электрические заряды. На одном основании — отрицательные, а на другом — положительные. Величины этих зарядов пропорциональны измеряемой напряжен-

ности ЭП. При этом сам проводящий диск приобретает потенциал референц-точки, т.е. точки пространства, совпадающей с центром диска.

Электрические заряды, индуцированные на основаниях диска, пропорциональны напряженности ЭП в точке размещения датчика. Поэтому необходимо установить взаимосвязь между индуцированными однородным полем зарядами и конструктивными параметрами датчика.

Для датчика с чувствительными элементами в форме круга с радиусом  $r=R$  эта взаимосвязь получена в работе [11]. В данной работе чувствительные элементы выполнены в форме круга с радиусом  $r < R$ , поэтому нужны дополнительные исследования.

Введем нормировку  $b=r/R$ . Она понадобится для построения математической модели датчика и будет отвечать за относительный размер чувствительного его элемента.

Индуцированные заряды на чувствительных элементах датчика можно определить двойного интегрирования плотности электрических зарядов на поверхностях чувствительных элементов датчика площадью  $S$

$$q = \iint_s \sigma \cdot dS, \quad (1)$$

где  $\sigma = -2\epsilon\epsilon_0 E_n = -2\epsilon\epsilon_0 \cdot E_0$  — поверхностная плотность заряда [2];  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $E_0$  — напряженность однородного ЭП;  $dS = \rho d\rho d\varphi$  — элемент площади чувствительного элемента.

Воспользовавшись выражением (1) и вводя полярные координаты для элемента  $dS$  поверхности чувствительных элементов, получим заряды чувствительных элементов 2 и 3:

$$q_0 = \pm 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 b^2 E_0 = \pm k_0 E_0, \quad (2)$$

где  $q_0$  — заряд, индуцируемый однородным полем; знак «+» и знак «-» соответственно относятся к чувствительным элементам 2 и 3;  $k_0 = 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 b^2$  — коэффициент пропорциональности в однородном поле.

Из выражения (2) следует, что электрические заряды, индуцированные на чувствительных элементах 2 и 3, пропорциональны напряженности однородного ЭП  $E_0$ . При этом коэффициент пропорциональности является постоянной величиной, т.к. определяется только через конструктивные параметры  $R$ ,  $b$  датчика и среды  $\epsilon$ .

В связи с тем что датчик состоит из двух чувствительных элементов, из него можно сформировать двойной датчик. Для двойного датчика целесообразно использовать его включение в измерительную цепь в дифференциальном режиме. При таком включении выходной сигнал датчика будет пропорционален сумме зарядов с чувствительных элементов 2 и 3

$$\begin{aligned} q_0^{\Delta\Phi} &= (+q_0) - (-q_0) = 2q_0 = \\ &= 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 b^2 E_0 = 2k_0 E_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Это выражение будет включено в математическую модель датчика и будет эталонным, отвечающим в математической модели за поведение датчика в однородном ЭП.

**Датчик в неоднородном поле точечного заряда.** Представим графическую картину неоднородного

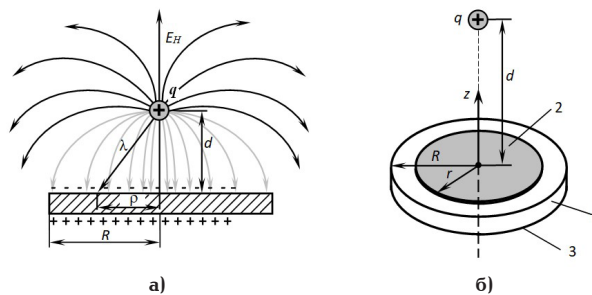


Рис. 3. Датчик напряженности ЭП в поле точечного источника: а) вид силовых линий; б) датчик с выделенной зоной снятия заряда в форме круга радиуса  $r$

ЭП в присутствии проводящего диска, находящегося в поле точечного заряда  $q$  (рис. 3а, б). Будем считать, что заряд  $q$  положительный и находится на расстоянии  $d$  от проводящего диска. Рис. 3а демонстрирует силовые линии ЭП при взаимодействии проводящего диска с точечным зарядом, а также показывает электрические заряды, индуцированные на поверхностях оснований проводящего диска. На рис. 3б показано, что чувствительные элементы датчика, с которых необходимо снимать заряды, выполнены в форме круга радиуса  $r < R$  меньшего радиуса диска.

Заряды, индуцированные на чувствительных элементах датчика, найдем из выражения (1), подставив в него поверхностную плотность  $\sigma$ , полученную в работе [11] для неоднородного поля точечного заряда

$$\sigma = - \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\left[1 + \left(\frac{\rho}{d}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} E_H, \quad (4)$$

где  $d$  — расстояние от источника ЭП до центра проводящего диска;  $\rho$  — расстояние от центра проводящего диска до точки наблюдения (см. рис. 3а);  $E_H$  — напряженность неоднородного ЭП. Тогда, с учетом сказанного, выражения для индуцированных на чувствительных элементах 2 и 3 датчика зарядов будут иметь вид

$$\begin{aligned} q_H &= \pm 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{\left(\frac{R}{d}\right)^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d}\right)^2}}\right] E_H = \\ &= \pm k_H E_H, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $q_H$  — заряд, индуцируемый неоднородным полем; знак «+» и знак «-» соответственно относятся к чувствительным элементам 2 и 3 (см. рис. 3,б);

$$k_H = 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{\left(\frac{R}{d}\right)^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d}\right)^2}}\right] \text{ — коэффициент}$$

пропорциональности в неоднородном поле.

Из выражения (5) следует, что коэффициент пропорциональности  $k$  в неоднородном поле является непостоянной величиной и зависит от расстояния  $d$ , не связанного с параметрами датчика. По-

этому коэффициент  $k$  будет меняться от перехода от одной точки измерения к другой, т.е. от одной степени неоднородности к другой. Чем меньше  $d$ , тем больше степень неоднородности поля. Зависимость коэффициента пропорциональности  $k$  от степени неоднородности поля будет приводить к погрешности, вызванной этой неоднородностью.

Для дальнейших исследований введем нормировку  $a=R/d$ . Параметр  $a$  будем рассматривать как пространственный диапазон измерения. Он также косвенно будет характеризовать степень неоднородности поля. Таким образом, в математической модели датчика параметр  $a$  будет отвечать как за пространственный диапазон измерения, так и за степень неоднородности ЭП.

С учетом сказанного приведем выражение (5) к виду

$$q_H = \pm 2\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 \frac{2}{a^2} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right] E_H. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что электрические заряды, индуцированные на чувствительных элементах 2 и 3, пропорциональны напряженности неоднородного ЭП  $E_H$ . При этом коэффициент пропорциональности не является постоянной величиной, т.к. он зависит от переменного параметра  $a$ , зависящего от удаленности датчика от источника поля.

При включении датчика в измерительную цепь в дифференциальном режиме происходит, так же как и в однородном поле, удвоение зарядов с двух чувствительных элементов 2 и 3. При этом величина удвоенного заряда будет определяться выражением

$$q_H^{\text{АнФ}} = \pm 4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 b^2 \frac{2}{a^2 b^2} \times \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right] E_H = 2k_H E_H. \quad (7)$$

Выражение (7) будет вторым выражением математической модели датчика, отвечающим за поведение датчика в неоднородном поле.

Полученные выражения (3) и (7) позволяют сделать оценку погрешности датчика от неоднородности ЭП, которая примет вид

$$\delta = \frac{q_H^{\text{АнФ}} - q_0^{\text{АнФ}}}{q_0^{\text{АнФ}}} \cdot 100 = \left[ \frac{2}{a^2 b^2} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1+a^2b^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100\%. \quad (8)$$

Выражение (8) будет являться третьим выражением математической модели рассматриваемого датчика.

Таким образом, созданы:

— конструктивная модель датчика, представленная рис. 1 и введенными выше в его описании геометрическими параметрами;

— математическая модель датчика, включающая выражения (3), (7) и (8) и введенные нормированные параметры  $a=R/d$  и  $b=r/R$ .

Параметры  $a$  и  $b$ , входящие в выражения (3), (7) и (8), позволяют найти в лучшем случае оптимальные, а в приемлемом случае рациональные конструктивные размеры как датчика, так и его чувствительных элементов, обеспечивающие минимальную погреш-

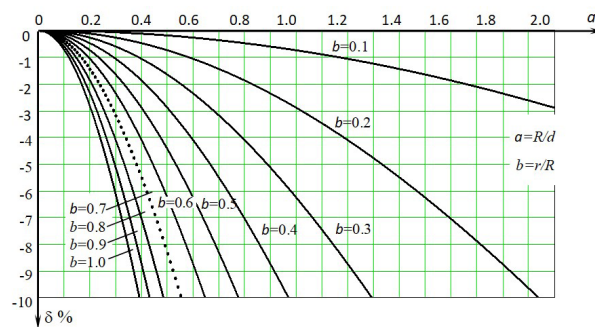


Рис. 4. Графики погрешности датчика от неоднородности ЭП в зависимости от относительного расстояния  $a$  до источника поля при постоянном относительном размере чувствительного элемента  $b$

ность при максимально возможном пространственным диапазоном измерения.

**Выбор конструктивных размеров чувствительных элементов датчика.** Для оптимального выбора конструктивных размеров чувствительных элементов датчика воспользуемся выражением (8) для погрешности датчика от неоднородности ЭП. Изменяя в выражении (8) параметры  $a$  и  $b$ , будем искать такое их сочетание, при котором погрешность датчика примет допустимые значения при максимально возможном пространственном диапазоне измерения.

Для этого воспользуемся математическим редактором MathCAD, в котором построим графики в зависимости погрешности  $\delta$  от параметров  $a$  и  $b$  (рис. 4).

Графики (рис. 4) позволяют при выбранном  $b=r/R$  найти радиус  $r$  чувствительного элемента, обеспечивающий датчику заданную погрешность в максимально возможном пространственном диапазоне  $a$ . Однако графики не позволяют оптимизировать размеры чувствительных элементов, т.к. они монотонно убывают и на них не наблюдается максимумов и минимумов. Однако рациональный выбор размеров чувствительных элементов возможен. Например, задаём пространственный диапазон  $0 \leq a \leq 1$ . В этом диапазоне расстояние до источника поля  $d=R$ . По рис. 4 находим, что этому пространственному диапазону соответствуют графики с параметрами чувствительных элементов  $b=0,3$ ;  $b=0,2$ ;  $b=0,1$ . Выбранным графикам при  $a=1$  будут соответствовать предельные погрешности  $-6\%$ ,  $-3\%$  и  $-0,8\%$ . Тогда выбранной предельной погрешности датчика, например  $-3\%$ , будет соответствовать  $b=0,2$ , а радиус чувствительного элемента  $r=0,2R$ . Сравнивая дисковый датчик, рассмотренный в данной работе ( $\delta = -3\%$ ,  $b=0,2$  и  $a=1$ ), и дисковый датчик, представленный в работе [11] ( $\delta = -3\%$ ,  $b=1$  и  $a=0,2$ ) делаем вывод, что рассматриваемый датчик при одинаковой погрешности  $\delta = -3\%$  имеет больший пространственный диапазон измерения, чем датчик, представленный в работе [11].

Из сказанного следует: пространственный диапазон стал шире в пять раз и изменился от  $a=0,2$  до  $a=1$ .

В результате проведенных исследований удалось создать датчик с лучшими метрологическими характеристиками, чем у известных датчиков, описанных в работах [6, 11].

**Результаты исследования.** Исследования, проведенные в данной работе, позволили создать однокординатный электроиндукционный датчик

напряженности ЭП дискового типа с требуемыми метрологическими характеристиками. Датчик имеет отрицательную погрешность  $\delta$  от неоднородности поля по модулю, не превышающую 3% в пространственном диапазоне измерения  $0 \leq a < R$ , где  $R$  — радиус дискового основания датчика. Для обеспечения требуемых метрологических характеристик датчика были подобраны рациональные размеры его чувствительных элементов. При этом рациональный радиус  $r$  чувствительных элементов, выполненных в форме круга, должен удовлетворять условию  $r < R$ , т.е. должен быть меньше радиуса  $R$  дискового основания датчика. При выполнении этого условия меньшему радиусу  $r$  чувствительного элемента будет соответствовать меньшая погрешность  $\delta$  от неоднородности поля и больший пространственный диапазон измерения.

В сравнении с известными датчиками, при одинаковой погрешности, предложенный датчик имеет пространственный диапазон измерения примерно в пять раз больше.

**Выводы и заключение.** По результатам исследований, проведенных в данной работе, можно сделать следующие выводы:

- разработана конструктивная модель электроиндукционного датчика напряженности ЭП дискового типа, в отличие от ранее известных датчиков, имеющих чувствительные элементы в форме круга радиуса  $r < R$ , где  $R$  — радиус дискового основания датчика;

- получены функциональные зависимости электрических зарядов, индуцированных полями на чувствительных элементах датчика от напряженности ЭП различной неоднородности;

- получены функциональные зависимости погрешности датчика, вызванной неоднородностью поля от его конструктивных параметров и пространственного диапазона измерения;

- составлена математическая модель электроиндукционного датчика напряженности ЭП дискового типа, включающая в себя функциональные зависимости электрических зарядов, индуцированных полями от напряженности ЭП различной неоднородности и зависимость погрешности датчика от его конструктивных параметров и пространственного диапазона измерения;

- выявлены рациональные конструктивные размеры чувствительных элементов датчика, с учетом требуемых погрешности и пространственного диапазона измерений, которые следует выбирать из условия  $r \leq 0,2R$ , где  $r$  — радиус круговых чувствительных элементов;  $R$  — радиус дискового основания датчика. Выполнение этого условия обеспечивает погрешность датчика в пространственном диапазоне измерения  $a \geq 1$  ( $d < R$ ), не превышающую –3 % (см. рис. 4).

Достоинством датчика является простота его конструкции.

Это позволяет изготовление датчика методами нанотехнологий. Малые габариты датчика дают возможность его размещения внутри измерительного прибора.

Таким образом, датчики предложенной конструкции позволяют измерять напряженность ЭП с погрешностью по модулю менее 3 % на расстояниях от источника поля  $d$ , менее радиуса  $R$  диска основания датчика, т.е.  $d \leq R$ .

В заключение отметим, что дальнейшие исследования будут направлены на улучшение метрологических характеристик дискового датчика.

## Библиографический список

1. Юркевич В. М., Кондратьев Б. А. О методике измерения напряженности и других характеристик электрического поля // Измерительная техника. 1980. № 5. С. 57–59.
2. Чугунов С. А., Юркевич В. М. Расширение зоны измерения параметров электрического поля при применении зондового метода // Измерительная техника. 1981. № 1. С. 33–35.
3. Климашевский И. П., Кондратьев Б. Л., Поletaев В. А. [и др.]. Измеритель вектора напряженности электрического поля высоковольтного оборудования // Измерительная техника. 1983. № 1. С. 48–49.
4. Biryukov S. V., Kaidanov F. G., Kats R. A., Lozhnikov V. Ya. Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines // CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September. Paris. 1986. 5 p.
5. Бирюков С. В. Теория и практика построения электро- и индукционных датчиков потенциала и напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2000. Вып. 11. С. 89–93.
6. Berent G. N., Plays I. R. Electric Field sensor // Instruments for scientific research. 1971. Vol. 6. P. 141–142.
7. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // Instruments for Scientific Research. 1978. Vol. 7. P. 933–935.
8. Steward M. F. Electric field measurement system. US patent 5315232; filed January 3rd, 1991; published May 24th, 1994.
9. Beasley W. H., Byerley L. G., Swenson J. A. [et al.]. Low power, low maintenance. Electric-field meter. US patent US006984971B1; filed March 14th, 2002; published January 10th, 2006.
10. Baicry M., Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US patent US20160238646 A1; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2017.
11. Бирюков С. В., Королева М. А. Электроиндукционный дисковый датчик напряженности электрического поля // Динамика систем механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 4. С. 177–182. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-177-182.
12. Biryukov S. V., Korolyova M. A. Electroinduction disk sensor of electric field strength // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 944 P. 012017-1–P. 012017-8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017.
13. Пат. 177779 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Данышина В. В., Эйсмонт Н. Г. № 2017131988; заявл. 12.09. 17; опубл. 12.03. 18, Бюл. № 8.
14. Benenson W., Harris J. W., Stöcker H. [et al.]. Handbook of Physics. New York [etc.]. Springer, 2002. 1181 p. ISBN 0-387-95269-1.

**БИРЮКОВ Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры физики Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

## Для цитирования

Бирюков С. В. Исследование электроиндукционного дискового датчика напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 134–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-134-139.

Статья поступила в редакцию 09.01.2023 г.

© С. В. Бирюков

## STUDY OF ELECTROINDUCTIVE DISK SENSOR OF ELECTRIC FIELD STRENGTH

Tasks related to the protection of biological and technical objects from the effects of electrical are relevant. One of these tasks is related to the development of electric field strength sensors with specified metrological characteristics. The aim of the study is to minimize the error of the known sensor and expand its spatial measurement range due to the rational choice of sensitive elements. The sensor proposed in the work has a negative error  $\delta$  from the field inhomogeneity modulo no more than 3 % in the spatial measurement range  $0 \leq a \leq R$ , where  $R$  is the radius of the disk base of the sensor. To ensure the required metrological characteristics of the sensor, rational dimensions of its sensitive elements are selected. In this case, the rational radius  $r$  of the sensing elements made in the shape of a circle must satisfy the condition  $r < R$ , i.e. it must be less than the radius  $R$  of the disk base of the sensor. If this condition is met, a smaller radius  $r$  of the sensing element will correspond to a smaller error  $\delta$  from the inhomogeneity of the field and a larger spatial measurement range. In comparison with known sensors, with the same error, the proposed sensor has a spatial measurement range approximately five times larger. This approach to the selection of sensitive elements allows us to design sensors with the best metrological characteristics.

**Keywords:** electric field, homogeneous field, inhomogeneous field, point source, intensity, disk sensor, error from field inhomogeneity, electrometric measurements.

### References

1. Yurkevich V. M., Kondrat'yev B. L. O metodike izmereniya napryazhennosti i drugikh kharakteristik elektricheskogo polya [On the methodology for measuring electric field strength and other characteristics] // *Izmeritel'naya tekhnika. Measuring Instruments*. 1980. No. 5. P. 57–59. (In Russ.).
2. Chugunov S. A., Yurkevich V. M. Rasshirenije zony izmereniya parametrov elektricheskogo polya pri primenenii zondovogo metoda [Extension of the electric field measurement area when using the probe method] // *Izmeritel'naya tekhnika. Measuring Instruments*. 1981. No. 1. P. 33–35. (In Russ.).
3. Klimashevskiy I. P., Kondrat'yev B. L., Poletayev V. A. [et al.]. Izmeritel' vektora napryazhennosti elektricheskogo polya vysokovol'nogo oborudovaniya. [Tension vector meter an electric field for high-voltage equipment] // *Izmeritel'naya tekhnika. Measuring Instruments*. 1983. No. 1. P. 48–49. (In Russ.).
4. Biryukov S. V., Kaidanov F. G., Kats R. A., Lozhnikov V. Ya. Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines // CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September. Paris. 1986. 5 p. (In Engl.).
5. Biryukov S. V. Teoriya i praktika postroyeniya elektroinduktsionnykh datchikov potentsiala i napryazhennosti elektricheskogo polya [Theory and practice of building electrical and inductive sensors for potential and electric field strength] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2000. Issue 11. P. 89–93. (In Russ.).
6. Berent G. N., Plays I. R. Electric Field sensor // *Instruments for Scientific Research*. 1971. Vol. 6. P. 141–142. (In Engl.).
7. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // *Instruments for Scientific Research*. 1978. Vol. 7. P. 933–935. (In Engl.).
8. Steward M. F. Electric field measurement system. US patent 5315232; filed January 3rd, 1991; published May 24th, 1994. (In Engl.).
9. Beasley W. H., Byerley L. G., Swenson J. A. [et al.]. Low power, low maintenance. Electric-field meter. US patent US006984971B1; filed March 14th, 2002; published January 10th, 2006. (In Engl.).
10. Baicry M., Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US patent US20160238646 A1; filed February 17th, 2016; published August 18th, 2017. (In Engl.).
11. Biryukov S. V., Koroleva M. A. Elektroinduktsionnyy diskovyy datchik napryazhennosti elektricheskogo polya [Electroinductive disc sensor for electric field strength] // *Dinamika sistem mekhanizmov i mashin. Dynamics of Mechanism and Machine*. 2017. Vol. 5, no. 4. P. 177–182. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-177-182. (In Russ.).
12. Biryukov S. V., Korolyova M. A. Electroinduction disk sensor of electric field strength // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2017. Vol. 944 P. 012017-1–P. 012017-8. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012017. (In Engl.).
13. Patent No. 177779 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya [Electric field strength sensor] / Biryukov S. V., Dan'shina V. V., Eysmont N. G. No. 2017131988. (In Russ.).
14. Benenson W., Harris J. W., Stöcker H. [et al.]. Handbook of Physics. New York [etc.]: Springer, 2002. 1181 p. ISBN 0-387-95269-1. (In Engl.).

**BIRYUKOV Sergey Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.  
SPIN-code: 9384-0078  
ORCID: 0000-0002-1362-9911  
AuthorID (SCOPUS): 7006438919  
Correspondence address: sbiryukov154@mail.ru

### For citations

Biryukov S. V. Study of electroinductive disk sensor of electric field strength // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 134–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-134-139.

Received January 09, 2023.

© S. V. Biryukov

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ И НЕПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

В статье реализуется пространственная модель отслеживания траектории с использованием динамических параметров положения объекта, а также траектории движения источника электрического поля. Результаты моделирования показывают высокую точность при оценке взаимосвязи между составляющими электрического поля и изменением положения. Результаты хорошо согласуются с результатами анализа методом конечных элементов. Также используется соотношение между ошибкой измерения составляющей электрического поля, горизонтальным углом, углом места и точностью отслеживания для анализа эффективности отслеживания. Кроме того, метод может быть совмещен с пространственно-временными координатами, и в таком случае конфигурация адаптируется под текущие условия при сохранении максимальной эффективности системы оценки в целом и позволяет прогнозировать изменения положения объекта как источника поля.

**Ключевые слова:** электрометрические измерения, электрическое поле, трехкоординатный электроиндукционный датчик, подвижные объекты.

**Введение.** С одной стороны, окружающая среда по своей природе является динамичной, как и отдельные источники электрического поля (ЭП), так и существует необходимость давать оценку ЭП в положении движения датчика (например, с использованием беспилотных воздушных систем) или другие аэрокосмические объекты [1]) для оценки параметров в произвольном местоположении, которые также могут быть не постоянными и во времени.

В работе [2] представлено использование датчика в нефтепромысловых хранилищах.

Стоит отметить, что техническое оснащение постоянно совершенствуется и усложняется. При разработке платформы контроля параметров ЭП [3, 4] задача оценки представляется для объектов наблюдений, находящихся в неподвижном состоянии на стационарной области. Для этого рассматривается применение направления IoT в задаче комплексной оценки ЭП на различных объектах.

В работе [5] предусматривается вариант, когда датчик может быть утерян для системы, например, неисправность связи или поломка датчика, в таком случае нейроконфигурация сохраняется и адаптируется по текущим условиям с сохранением максимальной эффективности системы, при этом объекты наблюдений также находятся в неподвижном состоянии.

Датчики параметров ЭП широко используются в различных отраслях народного хозяйства. Важно отметить, что в работе [6] представлены разработанные конструкции датчиков и сделаны оценки параметров ЭП, а в работе [7] представлен новый датчик в составе платформы контроля параметров ЭП.

Например, в работе [8] трехмерный датчик электрического поля и датчик диэлектрической проницаемости используются для обнаружения пространственного ЭП, а трехмерная система ЭП предлагается для проведения измерения этого поля.

Однако эти исследования не могут отслеживать траекторию движения объекта наблюдения в реальном времени при одновременном измерении ЭП.

Стоит обратить внимание на работу [9], в которой представлена модель отслеживания грозового облака, которая не учитывает положение движения первичного датчика. Важно отметить, что эффективные методы мониторинга оценки параметров ЭП в режиме реального времени особенно важны для оценки эффективной защиты и прогнозирования опасных влияний ЭП на окружающие объекты.

**Постановка задачи.** При использовании датчика в оценке подвижных и неподвижных объектов наблюдений важно реализовать локализацию источника в реальном времени. Поэтому следует не только оценивать параметры ЭП, но и отслежи-

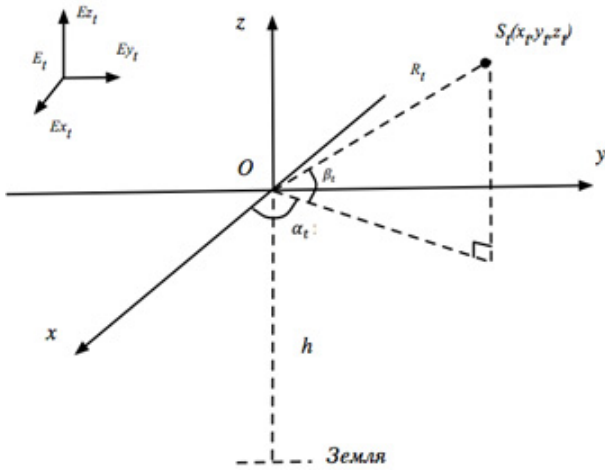


Рис. 1. Пространственная модель для отслеживания траектории движения

вать движение объекта и при этом определять динамические параметры положения. Необходимо учесть в значениях результирующих трехмерных компонент ЭП определение динамических параметров положения объекта и тем самым реализовать слежение за движением.

Также важно принять во внимание не только высокие метрологические характеристики оценки параметров ЭП, но и эффективность отслеживания движения в режиме реального времени с учетом изменяющихся параметров.

**Краткая теория.** На основе трехмерной системы координат упрощаем область наблюдаемого объекта до точечного заряда [10]. Получаем модель отслеживания траектории движения наблюдаемого объекта на рис. 1.

На рис. 1 представлена трехмерная система координат, с началом координат в точке  $O$ . Тогда точка  $O$  с координатами  $(0, 0, 0)$  будет задавать положение изотропного электроиндукционного датчика.

В свободной точке пространства  $S_t(x_t, y_t, z_t)$  — динамическое положение точки  $S_t$  исследуемого объекта, изменяющееся во времени  $T$ ;  $h$  — высота устройства относительно нулевого положения, соответственно, динамический горизонтальный угол и угол вертикальный относительно точки  $S_t$ ;  $R_t$  — расстояние в реальном времени от точки  $S_t$  до устройства  $O$ ;  $E_t$  — напряженность электрического поля в реальном времени в точке  $S_t$  измеренная прибором;  $E_{x_t}, E_{y_t}, E_{z_t}$  — напряженность ЭП относительно осей  $x, y, z$ .

Из рис. 1 видно, что при обнаружении источника ЭП рядом с датчиком ЭП, то будет накапливаться большое количество заряда. В это время ЭП, создаваемое источником поля, будет восприниматься трехмерным датчиком ЭП.

После этого координаты точки объекта могут быть получены расчетным путем, что может служить источником данных для отслеживания траектории движения объекта.

*Отслеживание пути движущегося объекта.* Важно отметить, что определение местоположения объекта для интерпретации отслеживания пути движения грозового облака имеет важное практическое значение для прогнозирования и предупреждения изменения параметров ЭП.

Согласно теории о том, что наведенный заряд равен зеркальному заряду в методе зеркального

отображения [10], область объекта рассматривается как точечный заряд  $q$ , а распределение потенциала  $\varphi_T$  точки в реальном времени относительно точки движения  $S_t$  получается следующим образом:

$$\varphi_T = \frac{1}{4\pi\epsilon_1} \left( \frac{q}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2 + (z_T - h)^2}} - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \frac{q'}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2 + (z_T + h)^2}} \right). \quad (1)$$

В уравнении (1)  $q'$  — это заряд изображения точечного заряда  $q$ .  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — диэлектрическая проницаемость воздуха и земли, на которой находится датчик  $O$ .

Поскольку напряженность ЭП, измеряемая датчиком, представляет собой трехмерный вектор, который можно представить в ортогональном разложении:

$$E_T = E_{x,T} + E_{y,T} + E_{z,T} \quad (2)$$

Если взять производные от распределения потенциала по направлениям осей  $x, y$  и  $z$ , то получаем

$$\begin{aligned} E_{x,T} &= \frac{\partial \varphi_T}{\partial x_T} = \\ &= \frac{-qx_T}{4\pi\epsilon_1} \left\{ \frac{[x_T^2 + y_T^2 + (z_T - h)^2]^{-3/2}}{-\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} [x_T^2 + y_T^2 + (z_T + h)^2]^{-3/2}} \right\}, \\ E_{y,T} &= \frac{\partial \varphi_T}{\partial y_T} = \\ &= \frac{-qy_T}{4\pi\epsilon_1} \left\{ \frac{[x_T^2 + y_T^2 + (z_T - h)^2]^{-3/2}}{-\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} [x_T^2 + y_T^2 + (z_T + h)^2]^{-3/2}} \right\}, \\ E_{z,T} &= \frac{\partial \varphi_T}{\partial z_T} = \\ &= \frac{-q}{4\pi\epsilon_1} \left\{ \frac{(z_T - h)[x_T^2 + y_T^2 + (z_T - h)^2]^{-3/2}}{-\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} (z_T + h)[x_T^2 + y_T^2 + (z_T + h)^2]^{-3/2}} \right\}. \quad (3) \end{aligned}$$

Допустим, что параметр координат объекта может превышать высоту  $h$ :

$$z_T \approx z_T - h \approx z_T + h. \quad (4)$$

Согласно рис. 1, расстояние  $R_T$  от точки  $S_T$  датчика  $O$  — это:

$$R_T = \sqrt{x_T^2 + y_T^2 + z_T^2}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) используем в уравнении (3) и получим:

$$\begin{cases} E_{x,T} = m(1-n)R_T^{-3}x_T, \\ E_{y,T} = m(1-n)R_T^{-3}y_T, \\ E_{z,T} = m(1-n)R_T^{-3}z_T. \end{cases} \quad (6)$$

В уравнении (6)

$$m = -\frac{q}{4\pi\epsilon_1} \quad \text{и} \quad n = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1}.$$

В уравнении (6) используются сферические координаты  $(R'_T, \alpha'_T, \beta'_T)$  расположения точки  $S_t$ , меняющейся во времени  $t$ .

$$\begin{cases} R'_T = \sqrt{\frac{m^2(1-n)^2}{E_{x,T}^2 + E_{y,T}^2 + E_{z,T}^2}}, \\ \alpha'_T = \arctan \frac{E_{y,T}}{E_{x,T}}, \\ \beta'_T = \arctan \frac{\epsilon_1 E_{z,T}}{\epsilon_2 \sqrt{E_{x,T}^2 + E_{y,T}^2}}. \end{cases} \quad (7)$$

В уравнении (7)  $R'_T$  — это инверсное значение  $R_T$  от объекта  $S_T$  до датчика  $O$ .  $\alpha'_T$  и  $\beta'_T$  — значения инверсии динамического горизонтального угла  $\alpha'_T$  и вертикального угла  $\beta'_T$ .

Когда точечный заряд  $q$  и  $\epsilon_1, \epsilon_2$ , диэлектрическая проницаемость известны, координаты объекта ( $R'_T, \alpha'_T, \beta'_T$ ) в реальном времени связаны с трехмерными векторами электрического поля. Соответственно, если  $E_{x,T}, E_{y,T}, E_{z,T}$  определены, то и траекторию движения объекта можно рассчитать.

Обозначим набор  $P$  динамических координат объекта, изменяющихся во времени  $T$ , определяется как

$$P = \left\{ (R'_{T_1}, \alpha'_{T_1}, \beta'_{T_1}), (R'_{T_2}, \alpha'_{T_2}, \beta'_{T_2}), \dots, (R'_{T_n}, \alpha'_{T_n}, \beta'_{T_n}) \right\}. \quad (8)$$

В выражении (8)  $T_1, T_2, \dots, T_n$  — это первая, вторая и  $n$ -ая точка времени в соответствии с координатами объекта ( $R'_{T_1}, \alpha'_{T_1}, \beta'_{T_1}$ ), ( $R'_{T_2}, \alpha'_{T_2}, \beta'_{T_2}$ ), ..., ( $R'_{T_n}, \alpha'_{T_n}, \beta'_{T_n}$ ).

Используя для расчета положения объекта выражения (7) и (8), возможно реализовать отслеживание траектории подвижного объекта наблюдения.

**Результаты.** Проведем анализ результатов отслеживания пути подвижных объектов наблюдения.

Предположим, что диэлектрическая проницаемость воздуха  $\epsilon_1$  принимается равной 1, диэлектрическая проницаемость земли  $\epsilon_2$ , на которой находится датчик, принимается равной 5. Кроме того, добавим стандартное отклонение  $\sigma_{E_i}$  компонентов измерения ЭП для общей производительности метода отслеживания.

Формула координат объекта наблюдения является основой метода отслеживания его движущегося пути. Согласно теории погрешности косвенного измерения [11, 12], погрешность измерения  $\sigma_{R'}, \sigma_{\alpha'}, \sigma_{\beta'}$  расстояния  $R'_T$ , горизонтального угла  $\alpha'_T$  и вертикального угла  $\beta'_T$ , обусловленная погрешностью измерения составляющей ЭП, может быть получена по выражению (7):

$$\begin{cases} \sigma_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R'_T}{\partial E_{x,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial R'_T}{\partial E_{y,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial R'_T}{\partial E_{z,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2}, \\ \sigma_\alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha'_T}{\partial E_{x,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial \alpha'_T}{\partial E_{y,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial \alpha'_T}{\partial E_{z,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2}, \\ \sigma_\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta'_T}{\partial E_{x,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial \beta'_T}{\partial E_{y,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial \beta'_T}{\partial E_{z,T}}\right)^2 \sigma_{E_i}^2}. \end{cases} \quad (9)$$

Выражение (9) еще более упрощается, и получаем:

$$\begin{cases} \sigma_R = \frac{6}{5} \pi^{3/2} R_T^3 \sigma_{E_i}, \\ \sigma_\alpha = \frac{12}{5} \pi R_T^2 \sqrt{1 + 25 \tan^2 \beta'_T} \sigma_{E_i}, \\ \sigma_\beta = \frac{12}{25} \pi R_T^2 \cos \beta'_T \times \\ \times \sqrt{(1 + 24 \sin^2 \beta'_T)(1 + 25 \tan^2 \beta'_T)} \sigma_{E_i}. \end{cases} \quad (10)$$

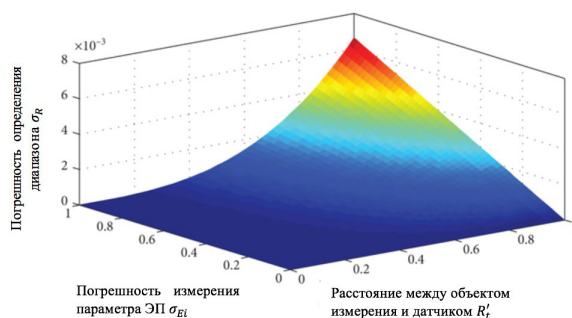


Рис. 2. График погрешности измерения расстояния объекта наблюдения

В выражении (10) ошибка  $\sigma_R$  отслеживания связана только с ошибкой измерения расстояния  $R'_T$  и ошибкой измерения ЭП, не зависящей от горизонтального угла  $\alpha'_T$  и вертикального угла  $\beta'_T$ . Кроме того, ошибки  $\sigma_{\alpha'}, \sigma_{\beta'}$  связаны с расстоянием  $R'_T$ , вертикальным углом  $\beta'_T$  и погрешностью измерения ЭП  $\sigma_{E_i}$ , но не зависят от угла  $\alpha'_T$ .

Следовательно, при практическом применении метода отслеживания получаем независимость результата от изменения угла горизонтального отклонения. В пределах максимального диапазона измерения изотропного электроиндукционного датчика, чем меньше расстояние  $R'_T$  и погрешность измерения ЭП  $\sigma_{E_i}$ , тем выше будет точность измерения дальности и определение местоположения объекта представленными расчётами.

Выражение (10) используется для изучения взаимосвязи между расстоянием  $R'_T$ , погрешностью измерения ЭП  $\sigma_{E_i}$  и погрешностью определения дальности метода слежения  $\sigma_R$ . Результаты моделирования показаны на рис. 2.

На рис. 2 погрешность определения дальности методом слежения  $\sigma_R$  увеличивается с увеличением расстояния  $R'_T$  и ошибки измерения электрического поля  $\sigma_{E_i}$ . Когда расстояние  $R'_T$  находится в диапазоне от 0 до 0,55 км, погрешность измерения дальности  $\sigma_R$  меньше зависит от погрешности измерения электрического поля  $\sigma_{E_i}$  и  $\sigma_{R_{max}}$  и достигает только 1 м. Однако когда расстояние  $R'_T$  превышает 0,55 км, ошибка дальности  $\sigma_R$  резко возрастает с увеличением ошибки  $\sigma_{E_i}$  и  $\sigma_{R_{max}}$  и достигает 6,4 м. Точно так же, когда ошибка измерения электрического поля  $\sigma_{E_i}$  меньше 0,15 кВ/м, погрешность дальности  $\sigma_R$  меньше зависит от расстояния  $R'_T$  и  $\sigma_{R_{max}}$  и достигает только 1 м. Однако при погрешности измерения электрического поля  $\sigma_{E_i}$  от 0,15 до 1 кВ/м погрешность возрастает  $\sigma_R$  до 6,4 м с увеличением расстояния  $R'_T$ . Несмотря на то, что погрешность дальности  $\sigma_R$  этого метода неизбежна, она находится в измеримом диапазоне и показывает хорошие характеристики дальности отслеживания.

При анализе погрешности определения местоположения датчиком ЭП, согласно выражению (10), исследование взаимосвязи между расстоянием  $R'_T$ , углом  $\beta'_T$  объекта наблюдения и погрешностью измерения его горизонтального угла  $\sigma_\alpha$ . Представим анализ на рис. 3.

На рис. 3 погрешность измерения горизонтального угла  $\sigma_\alpha$  метода слежения увеличивается с увеличением расстояния  $R'_T$  и вертикального угла  $\beta'_T$ . Когда расстояние  $r'$  составляет от 0 до 0,42 км, на погрешность измерения меньше влияет вертикальный угол  $\beta'_T$ , тогда погрешность измерения  $\sigma_\alpha$

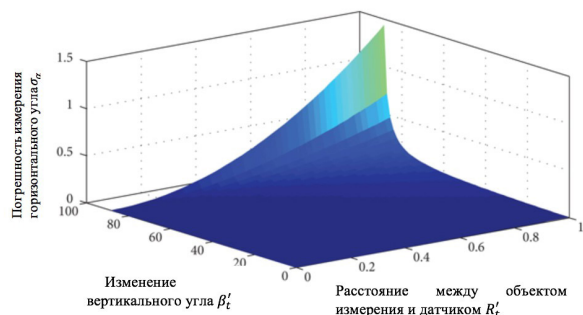


Рис. 3. График анализа погрешности измерения горизонтального угла

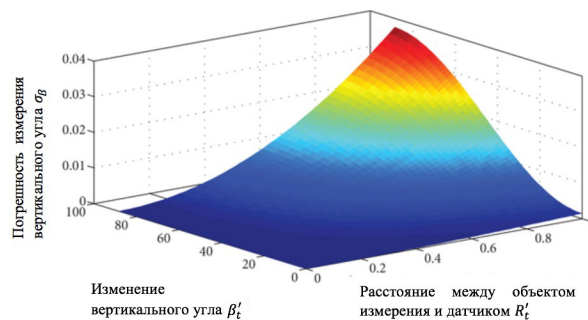


Рис. 4. График анализа погрешности измерения угла положения

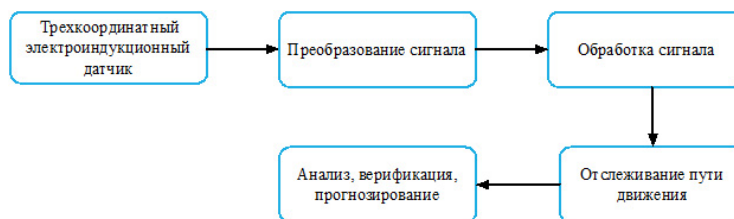


Рис. 5. Обобщенная структурная схема системы

составляет менее 0,2 градуса; однако когда расстояние  $r'$  превышает 0,42 км, погрешность измерения  $\sigma_\alpha$  экспоненциально возрастает с увеличением угла  $\beta'_T$  и достигает 1,07 градуса. Когда расстояние  $R'_T$  и угол  $\beta'_T$  становятся еще больше, погрешность  $\sigma_\alpha$  резко возрастает с увеличением этих двух величин. Однако в большинстве случаев ни то, ни другое практически не влияет на погрешность  $\sigma_\alpha$ .

Используя выражение (10), представим взаимосвязи между расстоянием  $R'_T$ , вертикального угла  $\beta'_T$  места объекта измерения и погрешностью измерения его угла  $\sigma_\beta$ , а результаты моделирования представим на рис. 4.

На рис. 4 погрешность измерения угла  $\sigma_\beta$  при отслеживании положения увеличивается с увеличением расстояния  $R'_T$  и угла  $\beta'_T$ ; при расстоянии от 0 до 0,35 км погрешность измерения  $\sigma_\beta$  меньше зависит от угла  $\beta'_T$  и достигает только 0,005 градуса; когда расстояние  $R'_T$  превышает 0,35 км, погрешность измерения  $\sigma_\beta$  медленно возрастает до 0,0375 градуса по мере увеличения угла. Точно так же, когда угол  $\beta'_T$  меньше 30 градусов, погрешность  $\sigma_\beta$  почти не зависит от расстояния  $R'_T$  и  $\sigma_{\beta\max}$  достигает только 0,01 градуса. Однако когда расстояние  $R'_T$  и угол  $\beta'_T$  значительно увеличиваются, погрешность измерения также возрастает только до 0,0375 градуса.

На точность определения места положения влияет дальность расстояния между целевым объектом измерения и датчиком. Из рис. 3 и рис. 4 легко увидеть, что, как только предельная дальность обнаружения прибора превышена, кривая, вызванная этим влиянием, становится все более резкой, а погрешность значительно возрастает. Однако, хотя погрешности определения места положения нельзя избежать, величина невелика и все еще поддается обнаружению и может быть учтена в последующих расчетах.

**Моделирование системы и конструкции изотропного электроиндукционного датчика.** Для практической реализации спроектирована система (рис. 5), включающая изотропный электроиндукционный датчик [6], в котором объединены блок изме-

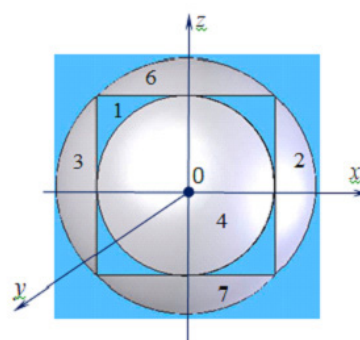


Рис. 6. Изотропный датчик напряженности электрического поля

рения ЭП блока калибровки ЭП и блока измерения диэлектрической проницаемости для оценки смежных объектов. Также объединяем данные локализации источника ЭП и данных геоположения для анализа экспериментальных результатов.

Один из вариантов конструкций изотропного электроиндукционного датчика схематично представлен на рис. 6.

Датчик представляет собой проводящее сферическое основание 1, на поверхности которого изолированно от него и друг от друга по трем координатным осям диаметрально расположены три пары проводящих чувствительных элементов. По оси  $x$ : 2 и 3, по оси  $y$ : 4 и 5 (на рис. 6 не показан), по оси  $z$ : 6 и 7. Чувствительные элементы выполнены в форме сферических сегментов, толщина которых много меньше радиуса сферического основания датчика. На чувствительных элементах, расположенных по трем координатным осям датчика, формируются сигналы, пропорциональные трем составляющим вектора напряженности ЭП  $E_x$ ,  $E_y$  и  $E_z$ . Путем их геометрического суммирования получают модуль вектора напряженности ЭП  $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ . Принцип действия датчика основан на явлении электростатической индукции.

**Выводы и заключения.** Таким образом, исследуя взаимосвязь между компонентой ЭП и физической величиной положения объекта наблюдения, можем сделать возможным отслеживание траектории движения. Получено соотношение координат объекта наблюдения с моментом времени. На основе изотропного датчика ЭП установлена модель отслеживания траектории движения объекта наблюдения.

Стоит отметить, что фактически положение объекта нельзя определить по одномерной составляющей ЭП, что приводит к недостаточной способности предупреждения в практическом применении, поэтому важно использовать именно оценку трех составляющих ЭП.

Общие характеристики определения параметров ЭП движущегося объекта наблюдения, места положения методом отслеживания пути движения объекта достаточны. В реальных экспериментах могут быть введены такие алгоритмы, как объединение данных и компенсация точности, чтобы уменьшить негативное влияние рода нелинейного поведения на производительность определения местоположения грозных облаков.

Результаты исследования показывают, что этот метод может точно отслеживать траекторию движения объекта наблюдения, и, кроме того, этот метод комбинируется с обработкой данных специализированной библиотекой Python [13] с геопозиционированием объекта, что позволяет лучше прогнозировать значение параметров ЭП с изменениями направления движения.

#### Библиографический список

1. Da X., Shen H., Hong L. Aircraft electric field measurements: recent research status and key technologies // *Journal of the Academy of Equipment Command and Technology*. 2008. Vol. 19, no. 3. P. 80–84.
2. Koto M., Okabe S. Multipoint measurement of electric field in oil gap by using electric field measurement systems based on Kerr effect // *IEEJ Transactions on Power and Energy*. 2006. Vol. 126, no. 3. P. 321–326. DOI: 10.1541/ieejpes.126.321.
3. Колмогорова С. С., Колмогоров А. С., Баранов Д. С., Мокряк А. В. Платформа контроля электромагнитного поля для обеспечения безопасности труда и промышленных объектов // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 2. С. 58–63. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-58-63.
4. Колмогорова С. С., Бирюков С. В., Колмогоров А. С., Баранов Д. С. Автоматизированный программно-технический комплекс системы сбора и интеллектуальной обработки данных // *Приборы*. 2022. № 7 (265). С. 48–55. EDN РКУАОЕ.
5. Колмогорова С. С., Романов Н. О. Программные модули децентрализованных беспроводных измерительных систем: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2022666361; заявл. 24.08.22; опубл. 31.08.22.
6. Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Проектирование электроиндукционных датчиков и средств измерений элек-

трических полей. Санкт-Петербург: ООО Реноме, 2022. 180 с. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46.

7. Колмогорова С. С., Бирюков С. В., Колмогоров А. С., Баранов Д. С. Расчет характеристик многоэлектродного дискового датчика и оценка его эффективности при использовании в составе платформы сбора и обработки данных // *Приборы*. 2022. № 8 (266). С. 1–13.
8. Xing H., He G., Ji X. Analysis on electric field based on three dimensional atmospheric electric field apparatus // *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 13, no. 4. P. 1696–1703. DOI: 10.5370/JEET.2018.13.4.1696.
9. Yang X., Xing H., Wei X. [et al.]. A Moving Path Tracking Method of the Thunderstorm Cloud Based on the Three-Dimensional Atmospheric Electric Field Apparatus // *Journal of Sensors*. 2021. Vol. 9. P. 1–13. DOI:10.1155/2021/8856033.
10. Миролюбов Н. Н., Костенко М. В., Левинштейн М. Л. Методы расчёта электростатических полей. Москва: Высшая школа, 1963. 415 с.
11. Пиотровский Я. Теория измерений для инженеров: пер. с польск. Москва: Мир, 1989. 335 с.
12. Leberl F. Introduction to the mathematics of inversion in remote sensing and indirect measurement // *Tectonophysics*. 2013. Vol. 65, no. 3. P. 376–378.
13. Колмогорова С. С., Кутузов М. Е. Обработка измерительных данных алгоритмами искусственного интеллекта: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2022666360; заявл. 24.08.22; опубл. 31.08.22.

**КОЛМОГорова Светлана Сергеевна**, кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии» Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 4216-9920

ORCID: 0000-0001-8032-0095

ResearcherID: E-4652-2017

Адрес для переписки: ss.kolmogorova@mail.ru

**БИРЮКОВ Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры физики Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

#### Для цитирования

Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Использование электроиндукционного датчика для отслеживания подвижных и неподвижных объектов наблюдений // *Омский научный вестник*. 2023. № 2 (186). С. 140–146. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-140-146.

Статья поступила в редакцию 09.02.2023 г.

© С. С. Колмогорова, С. В. Бирюков

## USING ELECTRO-INDUCTIVE SENSOR TO TRACE MOVING AND NON-MOVING OBJECTS TRACKED

The research carries out a spatial model of path tracking using the dynamic parameters of the object's position, as well as the path of motion of electric field source. The simulation results show high accuracy in estimating the dependence between the electric field components and position modifications. The results are in good agreement with the results of FEM analysis. The connection between the measurement error of the electric field component, horizontal angle, location angle, and tracking accuracy is also used to analyze the tracking performance. In addition, the method can be combined with spatiotemporal coordinates, in which case the configuration becomes appropriate to the current conditions while maintaining maximum efficiency of the estimation system as a whole and allows predicting changes in the position of the object as a field source.

**Keywords:** electrometric measurements, electric field, three-coordinate electroinductive sensor, moving objects.

### References

1. Da X., Shen H., Hong L. Aircraft electric field measurements: recent research status and key technologies // Journal of the Academy of Equipment Command and Technology. 2008. Vol. 19, no. 3. P. 80–84. (In Engl.).
2. Koto M., Okabe S. Multipoint measurement of electric field in oil gap by using electric field measurement systems based on Kerr effect // IEEJ Transactions on Power and Energy. 2006. Vol. 126, no. 3. P. 321–326. DOI: 10.1541/ieejpes.126.321. (In Engl.).
3. Kolmogorova S. S., Kolmogorov A. S., Baranov D. S., Mokryak A. V. Platforma kontrolya elektromagnitnogo polya dlya obespecheniya bezopasnosti truda i promyshlennykh ob"yektov [Electromagnetic field monitoring platform for ensuring occupational and industrial facilities safety] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. *Occupational Safety in Industry*. 2022. No. 2. P. 58–63. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-58-63. (In Russ.).
4. Kolmogorova S. S., Biryukov S. V., Kolmogorov A. S., Baranov D. S. Avtomatizirovanny programmno-tekhnicheskii kompleks sistemy sbora i intellektual'noy obrabotki dannykh [Computerized software and hardware complex of the system of data collection and intelligent processing] // Pribory. *Instruments*. 2022. No. 7 (265). P. 48–55. EDN PKYAOE. (In Russ.).
5. Kolmogorova S. S., Romanov N. O. Programmnyye moduli detsentralizovannykh besprovodnykh izmeritel'nykh sistem: cvidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022666361 [Software modules for decentralised wireless measuring systems: Certificate of State Registration of a Computer Programme. No. 2022666361]. (In Russ.).
6. Kolmogorova S. S., Biryukov S. V. Proyektirovaniye elektroinduktsionnykh datchikov i sredstv izmereniy elektricheskikh poley [Design of electro-induction sensors and electric field measuring instruments]. Saint Petersburg, 2022. 180 p. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46. (In Russ.).
7. Kolmogorova S. S., Biryukov S. V., Kolmogorov A. S., Baranov D. S. Raschet kharakteristik mnogoelektrodnogo diskovogo datchika i otsenka ego effektivnosti pri ispol'zovanii v sostave platformy sbora i obrabotki dannykh [Multi-electrode disk sensor performance analysis and assessment of its application as part of a data acquisition and processing platform] // Pribory. *Instruments*. 2022. No. 8 (266). P. 1–13. (In Russ.).
8. Xing H., He G., Ji X. Analysis on electric field based on three dimensional atmospheric electric field apparatus // Journal of Electrical Engineering and Technology. 2018. Vol. 13, no. 4. P. 1696–1703. DOI: 10.5370/JEET.2018.13.4.1696. (In Engl.).
9. Yang X., Xing H., Wei X. [et al.]. A Moving Path Tracking Method of the Thunderstorm Cloud Based on the Three-Dimensional Atmospheric Electric Field Apparatus // Journal of Sensors. 2021. Vol. 9. P. 1–13. DOI:10.1155/2021/8856033. (In Engl.).
10. Miroyubov N. N., Kostenko M. V., Levinshteyn M. L. Metody raschata elektrostacheskikh poley [Calculation methods for electrostatic fields]. Moscow, 1963. 415 p. (In Russ.).
11. Piotrovskiy Ya. Teoriya izmereniy dlya inzhenerov [Measurement theory for engineers] / trans. from Polish. Moscow, 1989. 335 p. (In Russ.).
12. Leberl F. Introduction to the mathematics of inversion in remote sensing and indirect measurement // Tectonophysics. 2013. Vol. 65, no. 3. P. 376–378. (In Engl.).
13. Kolmogorova S. S., Kutuzov M. E. Obrabotka izmeritel'nykh dannykh algoritmmami iskusstvennogo intellekta: cvidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM [Measurement data processing by artificial intelligence algorithms: Certificate of State Registration of a Computer Programme]. No. 2022666360. (In Russ.).

---

**KOLMOGOROVA Svetlana Sergeevna**, Candidate of Technical Sciences, Lecturer of Information Systems and Technology Department, Saint Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirova, St. Petersburg.

SPIN-code: 4216-9920

ORCID: 0000-0001-8032-0095

ResearcherID: E-4652-2017

**BIRYUKOV Sergey Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Correspondence address: sbiryukov154@mail.ru

#### For citations

Kolmogorova S. S., Biryukov S. V. Using electro-inductive sensor to trace moving and non-moving objects tracked // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 140–146. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-140-146.

Received February 09, 2023.

© S. S. Kolmogorova, S. V. Biryukov

## 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