

MAY 2026 | ISSUE #5(2.1)

**INTERNATIONAL JOURNAL
OF PROFESSIONAL
SCIENCE**

.....

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL



SCIPRO.RU

ISSN 2542-1085

SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

UDC 001
LBC 72

International Journal Of Professional Science: international scientific journal, Nizhny Novgorod, Russia: Scientific public organization “Professional science”, №5(2.1) - 2026. 195 p.

ISSN 2542-1085

International journal of Professional Science is the research and practice edition which includes the scientific articles of students, graduate students, postdoctoral students, doctoral candidates, research scientists of Russia, the countries of FSU, Europe and beyond, reflecting the processes and the changes occurring in the structure of present knowledge.

It is destined for teachers, graduate students, students and people who are interested in contemporary science.

All articles included in the collection have been peer-reviewed and published in the form in which they were presented by the authors. The authors are responsible for the content of their articles.

The information about the published articles is provided into the system of the Russian science citation index – RSCI under contract № 2819-10/2015K from 14.10.2015

The electronic version is freely available on the website <http://scipro.ru/ijps.html>

UDC 001

LBC 72



Editorial team

Chief Editor – Krasnova Natalya, PhD, assistant professor of accounting and auditing the Nizhny Novgorod State University of Architecture and Construction. (mail@nkrasnova.ru)

Zhanar Zhanpeisova — Kazakhstan, PhD

Khalmatova Barno Turdyhodzhaeva — Uzbekistan, MD, Professor, Head of the Tashkent Medical Academy

Tursunov Dilmurat Abdullazhanovich — Kyrgyzstan, PhD, Osh State University

Ekaterina Petkova, Ph.D Medical University — Plovdiv

Stoyan Papanov PhD, Department of Pharmacognosy and pharmaceutical chemistry, Faculty of Pharmacy, Medical University — Plovdiv

Materials printed from the originals filed with the organizing committee responsible for the accuracy of the information are the authors of articles

Editors N.A. Krasnova, 2026

Article writers, 2026

Scientific public organization
“Professional science”, 2026

Table of contents

INTRODUCTION	5
BIOLOGY AND BIOMEDICINE	6
Klyueva N.N., Dakak M.M., Drachuk S.V. Biochemical adaptation of the fetus to intrauterine hypoxia	6
CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE	14
Kornukova E.A., Grechushkin A.N. The analysis and evaluation of existing methods for calculation of the regeneration process of ion-exchange filters.....	14
Kornukova E.A., Grechushkin A.N. The probabilistic-statistical model of the regeneration process of ion-exchange filters	19
MEDICAL RESEARCH AND HEALTHCARE	25
Andreev I.R., Votyakova M.A., Zhuravleva M.A. Differential Equation Models in Epidemiology: SIR, SEIR.....	25
Berezkina E.D., Ezhova S.V. Semaglutide in clinical practice: systematic analysis of therapeutic effectiveness, safety profile, and strategic applications.....	29
Fazletdinov A.F., Mukhtarov G.R., Danilovtseva A.V. Severe acute posthemorrhagic anemia: modern concepts of pathophysiology, transfusion support and erythropoiesis recovery	34
Ivanov N.A., Avdeeva O.V. Opportunities to use physical therapy and physical therapy in the rehabilitation of SVO participants in Sochi.....	42
Sin'kova G.M., Shadarova A.V., Gurzhapova R.A., Sodboeva V.N. A comprehensive approach to primary prevention of overweight and obesity based on data on risk factors among the adult population affiliated with the polyclinic of Irkutsk City Clinical Hospital No. 1 in 2025	53
Yalkapov. M.T., Smirnova G.V., Emelin G.M. Age-related features of arterial wall structure: histological changes at different stages of human life	58
TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS	70
Gilfanova D.R., Grigoryan K.A. Development of an algorithm for ball detection and tracking in video for automated judging in rhythmic gymnastics	70
Kadushin A.Yu., Dementyev V.E., Sobolev N.S. Optimization of cellular mobile network parameters	88
Kopylov S.V. The main areas of use of unmanned aerial vehicles in the forestry industry	94
Kostyuk I.A., Krasnova M.N. Types of Abrasive Wear When Grinding Hard-to-Machine Metals....	99
Krasnova M.N., Batin A.D. Analysis of methods, mechanical characteristics, structure and phase composition of iron-based alloys during surface hardening	109
Nguyen Van Lam, Nguyen Van Quang, Hoang Van Lam, Bui Van Hieu. The influence of the surface temperature factor on the minimum drag of axisymmetric power-law bodies in a free-molecular hypersonic flow.....	128
Spetsanov N.S., Krasnova M.N. The manufacturing process of bevel gears.....	134
ENGINEERING APPLICATIONS	147
Barsbold B., Gerelmaa G. Feasibility study for optimizing spare parts supply.....	147
Krasnova M.N., Startsev A.S. Development of a slipway for assembling the guide apparatus of axial ventilation equipment.....	165
Sadvokasova D.A., Latypov V.M. The life cycle of an investment and construction project: from the formation of an idea to the operation of a real estate object.....	172
Zaeva M.A., Kurginyan E.A., Guliyev T.A. Methodology of proactive threat hunting for identifying compromise artifacts during zero-day attacks in corporate infrastructure.....	177
Zhukov D.S. Development of a special design of an eccentric mandrel	186
CONCLUSION	194

INTRODUCTION

The new issue of the International Journal of Professional Science, No. 5 (2.1), offers readers a deep dive into current issues in the humanities, covering a wide range of topics: from the transformation of modern media to ethical dilemmas in jurisprudence. The issue is structured to highlight the challenges facing education, law, and psychology in the age of digitalization and value transformations in society.

The legal section traditionally occupies a central position, presenting an interdisciplinary analysis of complex legal institutions. The authors address pressing and controversial topics, such as the legal consequences of euthanasia, the moral and legal aspects of the death penalty, and the historical roots of blood feuds. Of particular interest is the integration of high technology into the legal field: issues of digital rights regulation and the prospects for using artificial intelligence in the work of lawyers and attorneys.

The educational focus of the issue is focused on the specifics of working with Generation Z. The articles examine innovative approaches to teaching foreign languages and methods for professional orientation of future specialists. The cultural studies section complements the overall picture with an analysis of media production strategies in an international context, exploring contemporary formats for disseminating news in the digital space.

By bringing together research from various fields, this issue aims to provide comprehensive answers to questions about how the professional environment is adapting to changing sociocultural realities.

With best wishes and warm regards,
Editor-in-Chief
International Journal of Professional Science
Krasnova N.A.

BIOLOGY AND BIOMEDICINE

UDC 618.33

Klyueva N.N., Dakak M.M., Drachuk S.V. Biochemical adaptation of the fetus to intrauterine hypoxia

Биохимическая адаптация плода к внутриутробной гипоксии

Klyueva Nadezhda Nikolaevna,

Student of the Institute of Pediatrics and Reproductive Medicine,
Ural State Medical University.

Dakak Mario Mahdievich,

Student of the Institute of Pediatrics and Reproductive Medicine,
Ural State Medical University.

Drachuk Sergey Vladimirovich,

Associate Professor of the Department of Biochemistry, PhD,
Institute of the Clinical Pharmacology and Pharmacy,
Ural State Medical University.

Клюева Надежда Николаевна,

студент Института педиатрии и репродуктивной медицины,
Уральский государственный медицинский университет.

Дакак Марио Махдиевич,

студент Института педиатрии и репродуктивной медицины,
Уральский государственный медицинский университет.

Драчук Сергей Владимирович,

кандидат биологических наук, доцент кафедры биохимии,
Институт клинической фармакологии и фармации,
Уральский государственный медицинский университет.

Abstract. This article presents an analytical review of current data on the biochemical mechanisms of fetal adaptation to intrauterine hypoxia. The study included an analysis of recent literature on HIF signaling, microRNA-210 regulation, mitochondrial remodeling, and placental metabolic reprogramming. The study results demonstrated that fetal adaptation is not limited to circulatory centralization and anaerobic glycolysis. The role of HIF-1 α and HIF-2 α , as well as the effects of microRNA-210, which can lead to energy collapse during prolonged hypoxia, were identified. HIF-dependent suppression of oxidative phosphorylation is demonstrated in the placenta. The evolutionary mechanisms of adaptation are discussed using Tibetan women as an example, as well as the prospects for pharmacological modulation of these pathways. It is concluded that understanding the molecular basis of hypoxic adaptation is essential for developing strategies for the prevention and treatment of perinatal complications.

Keywords: hypoxia, fetus, placenta, HIF, microRNA-210, mitochondria, oxygen.

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор современных данных о биохимических механизмах адаптации плода к внутриутробной гипоксии. Процесс работы включал анализ литературных источников за последние годы, посвящённых HIF-сигналингу, регуляции микроРНК-210, митохондриальному ремоделированию и метаболическому перепрограммированию плаценты. Результаты исследования показали, что адаптация плода не ограничивается централизацией кровообращения и анаэробным гликолизом: выявлена роль HIF-1 α и HIF-2 α , эффекты микроРНК-210, которая при длительной гипоксии может приводить к энергетическому коллапсу. Показано, что в плаценте реализуется HIF-зависимое подавление окислительного фосфорилирования. Обсуждаются эволюционные механизмы адаптации на примере тибетских женщин, перспективы фармакологической модуляции этих путей. Заключается, что понимание молекулярных основ гипоксической адаптации необходимо для разработки стратегий профилактики и лечения перинатальных осложнений.

Ключевые слова: гипоксия, плод, плацента, HIF, микроРНК-210, митохондрии, кислород.

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент.
Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский
проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

ВВЕДЕНИЕ

Плацента – это временный, высокоспециализированный мультифункциональный орган, формирующийся в период беременности у плацентарных млекопитающих. Она обеспечивает физиологическую связь между органами матери и плода. Выполняет такие функции, как газообмен, питание, выделение, эндокринная регуляция, иммунологическая и тд. Гипоксия плода – это патологическое состояние, вызванное недостаточным снабжением тканей и органов кислородом или нарушением его утилизации. В клинической практике причины разделяют на антенатальные – возникающие во время беременности и интранатальные – проявляющиеся в родах [1]:

1. Антенатальные: заболевания матери (анемия, гестационный сахарный диабет, гипертензивные расстройства, инфекционные заболевания)- снижается кислородная ёмкость крови, нарушается маточно-плацентарный кровоток [1]. Осложнения беременности (плацентарная недостаточность, задержка роста плода, преэклампсия, перенашивание плода) – нарушаются структуры и микроциркуляция плаценты, снижается транспорт кислорода к плоду [1]. Вредные привычки (курение, алкоголь) – прямое токсическое воздействие на сосуды и ткани, интоксикация.

2. Интранатальные: аномалии родовой деятельности – нарушение маточно-плацентарного кровотока во время схваток, приводящее к острой гипоксии [1]. Ранний или поздний срок гестации – функциональная незрелость или инволюция плаценты, снижающая резервные возможности [1].

Внутриутробная гипоксия плода лежит в основе перинатальных осложнений вплоть до неонатальной смерти. С позиции биохимических процессов, адаптация плода к кислородному дефициту представляет собой каскад молекулярных реакций, инициируемых активацией транскрипционного фактора HIF. HIF-1а стабилизируется в период гипоксии и запускает экспрессию генов по регуляции ангиогенеза, транспорт глюкозы (GLUT-1, GLUT-3), гликолиз [10, 12].

Работы последних лет демонстрируют, что адаптация не ограничивается системными реакциями – включается глубокая перестройка клеточного метаболизма на уровне митохондрий [11, 12]. Исследования показали, что снижение потребления кислорода митохондриями плаценты происходит не в результате субстратного лимитирования, а из-за активного ингибирования митохондриального дыхания HIF-зависимые механизмы – феномен метаболического программирования [10, 11].

Адаптация к гипоксии – это комплексный процесс, реализуемый на системном,

клеточном и молекулярном уровнях. Системные и гемодинамические механизмы направлены на поддержание оксигенации жизненно важных органов. В ответ на гипоксию у плода возникает тахикардия, централизация кровообращения. Клеточные и молекулярные механизмы обеспечивают долговременную адаптацию и выживание клеток в условиях гипоксии:

1. **Активация стресс-сигналинга:** Ключевую роль играет в адаптации транскрипционный фактор HIF. Повышение уровня его α -субъединиц в ответ на гипоксию запускает экспрессию более 100 генов-мишеней, участвующих в компенсаторно-приспособительных реакциях.

2. **Метаболическое перепрограммирование:** Активация HIF-зависимых генов приводит к переключению клеточного метаболизма с кислород-зависимого окислительного фосфорилирования на анаэробный гликолиз, что позволяет клетке получать энергию даже при низком напряжении кислорода.

3. **Ангиогенез и эритропоэз:** HIF стимулирует экспрессию генов сосудистого эндотелиального фактора роста и эритропоэтина, что способствует улучшению васкуляризации тканей и увеличению кислородной ёмкости крови.

4. **Биохимическая адаптация:** в качестве маркеров оценки адаптационных возможностей плода рассматриваются нейротрофические факторы и другие сигнальные молекулы, отражающие состояние ЦНС и компенсаторные процессы в ответ на стресс.

ОБСУЖДЕНИЕ

1. HIF-сигналинг

HIF (Hypoxia-Inducible Factor) – это гетеродимерный транскрипционный фактор, являющийся главным сенсором и регулятором клеточного ответа на снижение уровня кислорода. Состоит из кислород-чувствительной α -субъединицы и конститутивно экспрессирующей β -субъединицы. В условиях нормальной оксигенации HIF-1 α гидроксилируется и быстро деградирует. По классической схеме понималось, что в условиях гипоксии HIF- α стабилизируется в результате снижения активности пролилгидроксилаз [10]. Однако анализ работ последних лет ставит этот механизм под сомнение в рамках универсальности.

McCracken [8] на материале плацент с задержкой роста плода и ранней преэклампсией обнаружил парадокс – накопление HIF-1 α и HIF-2 α происходит на фоне нормальной экспрессии пролилгидроксилазы – детектор кислорода и белка фон Хиппеля-Линдау, участвующего в разрушении белка HIF1- α в результате его убиквитинирования и последующей деградации в протеасомах [10] – это противоречит классической модели. Далее авторы предлагают объяснение: белок DJ-1, защищающий

клетки мозга от окислительного стресса, конкурирует с HIF1- α за связывание с белком Хиппеля-Линдау, тем самым блокируя деградацию HIF даже в присутствии активных пролилгидроксилаз [8]. Механизм подтвердили *in vitro*. В результате нашего анализа было выявлено, что данные получены на небольшой выборке ($n=15$). Кроме того, не было исследований динамики экспрессии DJ-1 в зависимости от срока гестации и тяжести гипоксии. Важно отметить, что HIF1- α в большей степени регулирует гликолиз и ангиогенез, когда HIF2- α – гены, связанные с окислительным стрессом и инвазией трофобласта [8, 10]. Можно предположить, что селективное ингибирование той или иной изоформы может стать основой для дифференциальной терапии.

Адаптация клеток к гипоксии реализуется через сложную систему внутриклеточных сигнальных каскадов. Изоформы HIF- α по-разному задействованы в адаптационном ответе в зависимости его продолжительности. HIF-1 α преимущественно регулирует реакцию на острую гипоксию, тогда как HIF-2 α поддерживает адаптацию в условиях длительного кислородного голодания. Переключение между изоформами во времени является критически важным для выживания и, как показало в последних исследованиях, контролируется микроРНК. МикроРНК способны напрямую ингибировать синтез изоформ HIF- α путём комплементарного связывания с 3'-нетранслируемой областью их мРНК. Так микроРНК могут влиять на стабильность HIF, воздействуя на компоненты убиквитинлигазного комплекса, ответственного за его деградацию [3].

2. МикроРНК-210 – универсальный адаптационный фактор

МикроРНК-210 - класс малых некодирующих РНК, осуществляющий постраскрипционное подавление экспрессии генов путем связывания 3'-нетранслируемой областью мРНК-мишеней [4]. Известно, что микроРНК подавляет апоптоз в условиях гипоксии [5, 9]. В плацентарной ткани микроРНК-210 индуцируется в ответ на гипоксию – подавление митохондриального дыхания снижает продукцию активных форм кислорода и уменьшает окислительный стресс [2, 4]. В условиях гипоксии стабилизированные транскрипционные факторы HIF-1 α транслицируются в ядро и связываются с гипоксии-чувствительным элементом, инициируя транскрипцию первичного транскрипта. Уникальность микроРНК210 заключается в широте её регуляторного воздействия. Она модулирует пролиферативную активность клеток путём подавления транскрипционных факторов, в условиях гипоксии выполняет цитопротективную функцию, подавляя проапоптотические белки – подавление апоптоза способствует выживанию клеток в условиях дефицита кислорода. Также микроРНК-210 стимулирует ангиогенез путём подавления ингибитора ангиогенных сигналов. Подавляет экспрессию белка, участвующего в гомологичной рекомбинации и репарации

двухцепочечных разрывов ДНК – это приводит к снижению эффективности репарации и накоплению генетических повреждений в гипоксических клетках.

ISCU (Iron-Sulfur Cluster Assembly Protein) – белок-каркас, играющий центральную роль в биосинтезе железо-серных кластеров. Служит платформой для сборки Fe-S кластеров *de novo*, которые затем переносятся на апобелки-мишени. Такие кластеры важны для ферментов дыхательной цепи, цикла Кребса и регуляции гомеостаза железа.

Возникает парадокс - подавление ISCU – ключевой мишени микроРНК-210, должно приводить к накоплению Fe²⁺ и усилению продукции АФК через реакцию Фентона [4, 9], однако, как мы писали ранее, в плаценте при гипоксии наблюдается снижение окислительного стресса [2, 4]. В плаценте должен быть компенсаторный механизм, утилизирующий избыток железа, например, ферритин (однако, нет прямых доказательств на связывание микроРНК-210 с ферритином) [12].

Особый интерес вызывает исследование Jin [5], которое продемонстрировало значительное повышение уровня микроРНК-210 в периферической крови новорожденных с асфиксией. Авторы не анализировали корреляцию с исходом. По нашим предположениям, кратковременная индукция микроРНК-210 может защищать митохондрии от перегрузки кислородом (феномен «гипоксического прекондиционирования»), тогда как длительная – приводит к энергетическому коллапсу клетки [3, 9].

3. Митохондриальное ремоделирование и метаболическое перепрограммирование плаценты

Концепцию метаболического перепрограммирования впервые описали в онкологии и только в последнее время экстраполировали на плаценту. Суть феномена заключается в HIF-зависимом подавлении окислительного фосфорилирования и переключении клеток на анаэробный гликолиз даже в присутствии достаточного количества кислорода. Исследования на уникальной модели высокогорной гипоксии, показали, что снижение потребления кислорода митохондрии плаценты происходит не в следствии субстратного лимитирования, а в результате активного ингибирования митохондриального дыхания [7]. Исследование тибетских женщин, адаптированных к высокогорью, митохондрии плаценты обладают повышенной эффективности окислительного фосфорилирования и сниженной продукции активной формы кислорода, что представляет собой эволюционный механизм адаптации плода. У нас возникает следующий вопрос: можно ли её воспроизвести фармакологически. Также авторы не обсуждают, какие именно изменения в дыхательной цепи обеспечивают этот эффект.

В ответ на гипоксию в митохондриях активируется сигнальный путь «реакцию

митохондриального развёрнутого белка» — это стресс-ответ, направленный на восстановление протеостаза в митохондриях. Модели ранней гипоксии у крыс показали «реакцию митохондриального развёрнутого белка» в плаценте, что проявилось повышением экспрессии глюкозо-регулируемого белка 78, стресс-ответ был снят митохондриально-адресованным антиоксидантом. Результат перспективный, но нужно учитывать, что крысы получали гипоксию 13-14% с 6 по 20 день беременности, что соответствует хронической гипоксии средней тяжести. Вопрос о том, работает ли митохондриально-адресованные антиоксиданты при тяжёлой острой гипоксии остаётся открытым. Кроме того, неизвестны возможные побочные эффекты долгосрочного применения митохондриально-адресованных антиоксидантов у плода.

Работа Jones в 2021 году на овцах продемонстрировало следующее – плод выделяет пируват, плацента превращает его в лактат и возвращает обратно и служит альтернативным энергетическим субстратом [6]. Механизм позволяет поддержать энергетический гомеостаз плода даже при значительном снижении маточно-плацентарного кровотока. Такое наблюдение радикально меняет мнение о плаценте, как о пассивном фильтре. Дополнительно в печени плода активируется глюконеогенез, а в тканях усиливаются челночные механизмы транспорта лактата и пирувата. Однако результаты были получены на модели с длительной гипоксией, нужны подтверждения на других моделях [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема предотвращения гипоксии плода является актуальной проблемой современной медицины. Важным является вопрос о биохимических механизмах адаптации плода к кислородному голоданию. Прежде всего, на основании анализа литературных данных, нами получена информация о системе стресс-сигналинга Hypoxia-inducible factors (HIFs). Повышение уровня альфа-субъединицы транскрипционного фактора HIF в ответ на гипоксию стимулирует экспрессию более 100 генов-мишеней, которые обеспечивают компенсаторные реакции.

Транскрипционный комплекс HIF является гетеродимером и состоит из альфа- и бета-субъединиц. У человека обнаружен HIF-1 α (фактор, индуцируемый гипоксией). Сигнальный каскад HIF опосредует влияние гипоксии. Гипоксия способствует образованию кровеносных сосудов у эмбрионов (и в процессе развития злокачественных опухолей).

HIF имеет жизненно важное значение для человека и млекопитающих. Инактивация этих генов приводит к перинатальной смерти. HIF-1 имеет важное значение для выживания хондроцитов.

HIF-1 активирует несколько генов. К ним относятся гены ферментов гликолиза,

которые позволяют синтезировать АТФ независимо от присутствия кислорода. Также активируется ген фактора роста эндотелия сосудов (VEGF), который способствует ангиогенезу.

В 2019 году У. Кэлин, Г. Семенза и П. Рэдклифф получили Нобелевскую премию по физиологии и медицине за открытие механизмов, посредством которых клетки воспринимают доступность кислорода и адаптируются к ней.

В нормоксических условиях HIF-1 α гидроксимирируется по двум остаткам пролина. Затем комплекс связывается с VHL и помечается убиквитином, что приводит к протеосомной деградации. В условиях гипоксии HIF-1 α перемещается в ядро клетки и связывается с HIF-1 β . Этот комплекс связывается с ДНК (участок HRE), что приводит к транскрипции генов, которые участвуют в эритропоэзе, гликолизе, ангиогенезе.

Разрабатываются селективные ингибиторы пролил-гидроксилазы HIF для лечения анемии («Роксадустат», «Вададустат» и др.).

HIF участвует в ангиогенезе для снабжения раковых клеток кислородом и питательными веществами, поэтому ингибиторы HIF (фенетилизоцианат, акрифлавин) исследуют на предмет противодействия раковым опухолям.

Считаем также важным вопрос об участии микро-РНК в адаптации к гипоксии. Микро-РНК – малые некодирующие молекулы РНК, длиной 18 – 25 нуклеотидов. Они принимают участие в транскрипционной и посттранскрипционной регуляции экспрессии генов путём РНК-интерференции.

Микро-РНК, участвующие в регуляции клеточного ответа на гипоксию, можно разделить на три группы. Во-первых, это молекулы, подавляющие синтез изоформ HIF. Во-вторых, это группа микро-РНК, которая влияет на деградацию альфа-субъединиц HIF при нормоксии. Третья группа – микро-РНК, влияющие на экспрессию белков, участвующих в реализации метаболического ответа на гипоксию (гликолиз, окислительное фосфорилирование).

References

1. Баев О.Р., Приходько А.М., Зиганшина М.М. и др. Антенатальные и интранатальные факторы риска, ассоциированные с гипоксией плода в родах. Акушерство и гинекология. 2022 URL: <https://aig-journal.ru/articles/Antenatalnye-i-intranatalnye-factory-riska-associirovannye-s-gipoksiei-ploda-v-rodah.html>

2. Вдовиченко Н.Д. Сравнительный анализ изменений показателей сердечного ритма самок и плодов крыс в условиях гемической гипоксии. Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2025 URL: <https://rusjphysiol.org/index.php/rusjphysiol/article/download/2616/1224/>

3. Силина М.В., Джалилова Д.Ш., Макарова О.В. Роль микроРНК в регуляции клеточного ответа на гипоксию // Биохимия. - 2023. - Т. 88. - №6. - С. 913-932. doi: 10.31857/S0320972523060039 URL: <https://journals.rcsi.science/0320-9725/article/view/144297>

4. **Bian X., Liu J., Yang Q., et al.** MicroRNA-210 regulates placental adaptation to maternal hypoxic stress during pregnancy. *Biology of Reproduction*. 2021;104(2):418-429. DOI: 10.1093/biolre/ioaa201 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33074310/>

5. **Jin Y., et al.** Highly expressed miR-210 in the peripheral blood is closely associated with asphyxiated neonates. *Translational Pediatrics*. 2023;12(6):1181-1191. DOI: 10.21037/tp-22-456 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37427073/>

6. Jones A.K., et al. Uteroplacental nutrient flux and evidence for metabolic reprogramming during sustained hypoxemia. *Physiological Reports*. 2021;9(18):e15033. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34558219/>

7. Liu H., et al. Enhanced placental mitochondrial respiration in Tibetan women at high altitude. *Frontiers in Physiology*. 2021;12:697045. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34335303/>

8. McCracken S.A., et al. Dysregulation of oxygen sensing/response pathways in pregnancies complicated by idiopathic intrauterine growth restriction and early-onset preeclampsia. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(5):2772. DOI: 10.3390/ijms23052772 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35269911/>

9. Meng X., Zhang P., Zhang L. Fetal Hypoxia Impacts on Proliferation and Differentiation of Sca-1+ Cardiac Progenitor Cells and Maturation of Cardiomyocytes: A Role of MicroRNA-210. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(19):10765. DOI: 10.3390/ijms221910765 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32244901/>

10. Qian Li, Xiaowei Wei, Yunqing Zhang & Yi Lin. Trophoblast adaptation to hypoxia: balance and dysfunction. *Cell Communication and Signaling*. 2025;23:538. DOI: 10.1186/s12964-025-02531-2 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41462473/>

11. Siragher E., Sferruzzi-Perri A.N. Placental hypoxia: What have we learnt from small animal models? *Placenta*. 2021;113:29-47. DOI: 10.1016/j.placenta.2021.03.018 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34074553/>

12. Yuanfeng Gao, Xin Yu, Yuefan Wang, Hongmei Wang, Yan-Ling Wang & Ng Shyh-Chang. Metabolic control of feto-placental development and pregnancy outcomes. *Nature Reviews Endocrinology*. 2025. DOI: 10.1038/s41574-025-01206-9 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41291202/>

CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE

UDC 661.183.12

Kornukova E.A., Grechushkin A.N. The analysis and evaluation of existing methods for calculation of the regeneration process of ion-exchange filters

Анализ и оценка существующих методик расчета процесса регенерации ионообменных фильтров

Kornukova Ekaterina Andreevna,

Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Grechushkin Andrey Nikolaevich,

Associate Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Гречушкин Андрей Николаевич,

доцент кафедры экологии и промышленной безопасности, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Корнукова Екатерина Андреевна,

магистрант, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Аннотация. В данной статье рассмотрены основные подходы к описанию процессов ионного обмена, а также методики расчета основных параметров регенерации катионита в натриевой форме. В настоящее время при проектировании установок по обессоливанию и умягчению воды используют эмпирические зависимости и коэффициенты, полученные в результате наладки и длительной эксплуатации промышленных объектов. На основании выявленных недостатков существующих методик расчета предлагается изменить подход к описанию процесса ионного обмена и представить его как случайный марковский процесс, в частности, перейти к рассмотрению вероятностно-статистических моделей диффузионного типа.

Ключевые слова: ионный обмен, регенерация, катионит в натриевой форме, методика расчета, продольная диффузия ионов.

Abstract. This article examines the main approaches to describing ion exchange processes, as well as methods for calculating the key parameters for sodium cation exchange resin regeneration. Currently, when designing water desalination and softening plants, empirical relationships and coefficients obtained from commissioning and long-term operation of industrial facilities are used. Based on the identified disadvantages of existing calculation methods, it is proposed to change the approach to describing the ion exchange process and present it as a random Markov process, in particular, to move to the consideration of probabilistic-statistical models of the diffusion type.

Keywords: ion exchange, regeneration, sodium cation exchange resin, calculation method, longitudinal diffusion of ions.

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

На сегодняшний день достичь технологической эффективности и экономической рентабельности в области промышленной водоподготовки невозможно без оптимизации и расчета сложных ионообменных процессов. Зачастую выбор числа ступеней очистки, типа ионита, размера фильтров, высоты загрузки смолы и режима регенерации осуществляется на основе эмпирических формул, зависимостей и коэффициентов, полученных экспериментально [1, 2]. При этом корректировка разработанных расчетных методик и полученных данных производится в ходе пусконаладочных работ и при длительной эксплуатации ионообменных установок.

Традиционно методика расчета регенерации ионообменного аппарата, основанная на использовании рабочей емкости ионита $E_{\text{раб}}$ с учетом эмпирических коэффициентов, необходимых для определения расхода поваренной соли P_c на одну регенерацию [3]. Данная методика использует осредненные характеристики протекающих процессов и не требует применения выражений для описания явного вида изотермы ионного обмена и фронта регенерации. Для ее эффективного практического использования необходимо получение большого объема экспериментальных данных при различном аппаратном оформлении технологического процесса в различных эксплуатационных условиях. Наибольшую трудность представляет определение значения рабочей обменной емкости, так как данная характеристика зависит от множества факторов, к которым относятся, как свойства самого ионита, так и условия его эксплуатации и расход реагентов.

Значение рабочей обменной емкости $E_{\text{раб}}$ можно рассматривать, как характеристику защитного действия слоя ионита, и в таком случае определить на основании выходной кривой ионитового фильтра:

$$E_{\text{раб}} = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{ф}}) * Q}{S * h}, \quad (1)$$

где $C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация удаляемого иона, г-экв/м³;

$C_{\text{ф}}$ – концентрация удаляемого иона в фильтрате, г-экв/м³;

Q – количество обработанной воды за фильтроцикл, м³;

S – площадь поперечного сечения фильтра, м²;

h – высота слоя ионита, м.

Альтернативная зависимость для определения рабочей обменной емкости представлена в работе [4]:

$$E_{\text{раб}} = \alpha_{Na} * \beta_{Na} * E_{\text{полн}} - 0,5 * q_{\text{уд}} * Ж_{\text{о исх}}, \quad (2)$$

где α_{Na} – коэффициент эффективности регенерации натрий-катионита, учитывающий неполноту регенерации катионита;

β_{Na} – коэффициент, учитывающий снижение обменной емкости катионита по Ca^{2+} и Mg^{2+} вследствие частичного задержания катионитов Na^+ ;

$E_{полн}$ – полная обменная емкость катионита, г-экв/м³, определяемая по заводским паспортным данным;

$q_{уд}$ – удельный расход воды на отмывку катионита, м³ на 1 м³ катионита.

В случае использования представленных зависимостей удастся определить только расход реагентов P_c , необходимых для проведения регенерации:

$$P_c = \frac{f_k * H_k * E_{раб}^{Na} * a_c}{1000}, \quad (3)$$

где f_k – площадь одного фильтра, м²;

H_k – высота слоя катионита в фильтре, м;

a_c – удельный расход соли на 1 г-экв рабочей обменной емкости катионита.

Однако при проектировании и пусконаладке ионообменных фильтров также важно предварительно оценить время регенерационного цикла и распределение концентраций по высоте слоя смолы. Это, в свою очередь, возможно при разработке математической модели работы фильтра [5, 6].

В рамках феноменологического подхода для решения прикладных задач наиболее распространена одномерная математическая модель движения ионов в сорбирующей пористой среде с постоянным коэффициентом диффузии. Ее основные уравнения могут быть записаны в следующем виде [7]:

– уравнение материального баланса:

$$w \frac{\partial c_i}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial a_i}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2}; \quad (4)$$

– уравнение статики:

$$a_i = f_i(c_1^*, \dots, c_n^*); \quad (5)$$

– уравнение внешнедиффузионной кинетики:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta(c_i - c_i^*); \quad (6)$$

– уравнение внутридиффузионной кинетики:

$$\frac{\partial(ar)}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2}{\partial r^2}(ar). \quad (7)$$

В уравнениях (4)–(7) приняты следующие обозначения: w – скорость движения регенерирующего раствора; c_i – концентрация в растворе; x – высота загрузки; a_i – концентрация в ионите; c_i^* – равновесная концентрация в растворе; D – коэффициент продольной диффузии,

r – радиус зерна ионита; β – коэффициент внешней диффузии;
 D^* – коэффициент внутренней диффузии.

В общем виде аналитическое решение системы до настоящего времени не получено, известны лишь частные случаи его решения, при этом основную трудность представляет описание коэффициента продольной диффузии D [8]. В настоящее время проявления продольной диффузии при ионном обмене связывают с неравномерностью укладки частиц ионита в слое, неодинаковой скоростью жидкости у поверхности зерна и на некотором отдалении от него, неравномерным распределением потока по сечению аппарата («пристеночный эффект»), наличием застойных зон, а также с конвенционным перемешиванием в потоке.

Представленные материалы позволяют сделать вывод, что в основе регенерационных процессов ионного обмена лежат как детерминированные, так и случайные составляющие, которые в процессах водоподготовки деминерализованной воды могут играть определяющую роль. Оценка случайных составляющих процесса регенерации возможна при детальном рассмотрении вероятностно-статических диффузионных моделей.

References

1. Комарова И.В., Галкина Н.К. М.М. Сенявин и оптимизация ионообменных процессов на основе математического моделирования /Сорбционные и хроматографические процессы, – 2017. –Т.17 – №6, с. 907-916.
2. Соболев, И. В. Ионообменные процессы очистки воды / И. В. Соболев, А. А. Варивода // Здоровьесберегающие технологии, качество и безопасность пищевой продукции: Сборник статей по материалам Всероссийской конференции с международным участием – Краснодар, 2021. – С. 93-96.
3. Технический справочник по обработке воды: [в 2 т.: перевод с французского] / [Л. Андриамирадо и др.; науч. ред.: М. И. Алексеев и др.]. — 2-е изд. — Санкт-Петербург: Водоканал Санкт-Петербурга, Новый журнал, 2007.
4. Беликов С.Е. Водоподготовка: справочник / Под ред. С. Е. Беликова. - Москва: ИД "Аква-Терм", 2007.
5. Комарова И.В., Галкина Н.К., Анфилов Б.Г., Шептовецкая К.И. Визуализация процесса ионообменного умягчения воды с целью прогнозирования и управления // Сорбционные и хроматографические процессы, т. 8(1). –2008. –С. 30-36.

6. Корниенко Т.С., Загорулько Е.А., Бондарева Л.П., Гапеев А.А. Математическая модель динамики сорбции в слое ионообменника // Сорбционные и хроматографические процессы. – т. 11(6). – 2011. – С. 895-899.

7. Юрчевский Е.Б., Комарова И.В., Галкина Н.К. «Прогнозирование технологических характеристик противоточных ионообменных фильтров с использованием математического моделирования» // Теплоэнергетика. – 2003. – № 7. – С. 29–34.

8. Кокотов, Ю. А. Теоретические основы ионного обмена. Сложные ионообменные системы / Ю. А. Кокотов, П. П. Золотарев, Г. Э. Елькин. – Л.: Химия, 1986. – 280 с.

UDC 661.183.12

Kornukova E.A., Grechushkin A.N. The probabilistic-statistical model of the regeneration process of ion-exchange filters

Вероятностно-статистическая модель процесса регенерации ионообменных фильтров

Kornukova Ekaterina Andreevna,

Master's Degree, Bauman Moscow State Technical University,
Department of Ecology and Industrial Safety, Moscow

Grechushkin A.N.,

PhD, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University,
Department of Ecology and Industrial Safety, Moscow

Корнукова Екатерина Андреевна,
магистр, МГТУ им. Н.Э. Баумана,

кафедра «Экология и промышленная безопасность», г. Москва

Гречушкин А.Н.,

к.т.н, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана,

кафедра «Экология и промышленная безопасность», г. Москва

Abstract. *This article presents a diffusion-based probabilistic-statistical model for describing the parallel-flow regeneration process of a cation exchange filter. To study ion exchange processes with a vertical fixed resin bed, an experimental setup was constructed, and an experimental methodology was developed to determine the key parameters of cation exchange resin regeneration with a sodium chloride solution. When comparing experimental and calculated data, the discrepancy does not exceed 15%.*

Keywords: *ion exchange, regeneration front, probabilistic-statistical model, distribution density, Fokker-Planck-Kolmogorov equation.*

Аннотация. *В данной статье представлена вероятностно-статистическая модель диффузионного типа для описания процесса параллельноточной регенерации катионообменного фильтра. Для исследования ионообменных процессов с вертикальным неподвижным слоем смолы создан экспериментальный стенд и разработана методика проведения эксперимента с целью определения основных параметров регенерации катионита раствором поваренной соли. При сопоставлении экспериментальных и расчетных данных расхождение не превышает 15%.*

Ключевые слова: *ионный обмен, фронт регенерации, вероятностно-статистическая модель, плотность распределения, уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент.
Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Ионообменная технология для обессоливания и умягчения природной воды широко применяется в энергетике, химии, металлургии и других отраслях промышленности, поэтому следует отметить, что разработке расчетных методик и проектированию ионитных фильтров на сегодняшний день уделяется большое внимание [1, 2]. Обзор научной литературы показал, что усовершенствовать расчет ионообменника можно за счет учета диффузионной составляющей, обусловленной

неравномерным распределением потока по сечению аппарата, наличием застойных зон и конвенционным перемешиванием в потоке [3, 4].

Описание предложенной математической модели

Пусть процесс регенерации катионита в натриевой форме происходит в цилиндрическом ионообменнике с неподвижным однородным слоем монодисперсной смолы длиной L_0 и площадью свободного поперечного сечения F_0 . Введём систему отсчёта, связанную с безразмерной координатой оси симметрии фильтра S и временем $t = t_0 = 0$, которое отсчитывается от начала процесса подачи регенерационного раствора в фильтр.

Предположим, что в полностью истощенный катионит подается раствор поваренной соли с постоянной концентрацией C_{NaCl} и расходом $Q_0 = Q_0(t) = const$, а движение регенерирующего раствора происходит прямотоком со средней скоростью $W_0 = \frac{Q_0}{F_0} = const$. Используя уравнение материального баланса запишем систему уравнений динамики равновесного ионного обмена с учетом диффузионной составляющей [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial a'}{\partial t} = -W_0 \frac{\partial c}{\partial S} + D \frac{\partial^2 c}{\partial S^2} \\ a = \psi(c), \end{cases} \quad (1)$$

где $a = \psi(c)$ – уравнение изотермы ионного обмена,

D – коэффициент продольной диффузии,

c – текущая концентрация вытесняемого иона в потоке,

a и a' – равновесные величины ионного обмена и концентрация вытесняемого иона в ионите соответственно.

Среднюю скорость движения стационарного фронта регенерации можно вычислить по формуле:

$$W' = W_0 \frac{Ж}{\rho_N * a}, \quad (2)$$

где $Ж$ – общая жесткость, обусловленная вытеснением иона;

$\rho_N = const$ – насыпная плотность ионита в набухшем состоянии;

a – величина ионного обмена.

Наряду со средней скоростью движения фронта регенерации по слою ионита $W'(S, t)$ в рассматриваемом процессе будут постоянно присутствовать и случайные составляющие этой скорости – \tilde{W} , влиянием которых пренебречь нельзя, что позволяет записать:

$$W = W'(S, t) + \tilde{W}. \quad (3)$$

Поскольку величина \tilde{W} в выражении (3) обусловлена наличием случайных составляющих, действующих на молекулы вытесняемого иона, как со стороны потока дисперсионной среды, так и ионита, то и скорость W , и координата S , также будут случайными величинами. Таким образом, можно перейти к рассмотрению функции плотности распределения

$$f = f(S, t).$$

Величина $f(S, t)dS$ представляет собой вероятность того, произвольный ион будет иметь в момент времени t координату в интервале $(S, S + dS)$. Тогда для описания гидродинамической стадии процесса регенерации катионита можно воспользоваться уравнением Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) в виде:

$$\frac{\partial f(S, t)}{\partial t} = -W'(t) \frac{\partial}{\partial S} f(S, t) + \frac{B}{2} \frac{\partial^2}{\partial S^2} f(S, t), \quad (4)$$

где $W'(S, t)$ – величина, характеризующая детерминированную составляющую системы в пространстве S ;

$B(S, t)$ – величина, характеризующая случайную составляющую протекающих процессов в пространстве S .

Решения уравнения (4) могут быть представлены в виде элементарных функций и будут иметь следующий вид:

$$f(S, t) = \frac{C}{\sqrt{2\pi Bt}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{((S - \int_0^t W'(t)dt) - \xi)^2}{2Bt} \right] f_0(\xi) d\xi, \quad (5)$$

где C – постоянная, определяемая из условий нормировки.

Описание экспериментального стенда

Для исследования кинетики и динамики процесса регенерации ионообменной смолы был разработан экспериментальный стенд, одним из основных элементов которого является вертикальная колонна с неподвижным слоем катионита. Технологическая схема экспериментального стенда представлена на рис.1. Для приготовления регенерирующего раствора используется пермеат и поваренная соль, при смешении которых готовится раствор $NaCl$. Исходно колонна заполнялась катионитом истощалась с помощью раствора хлорида кальция.

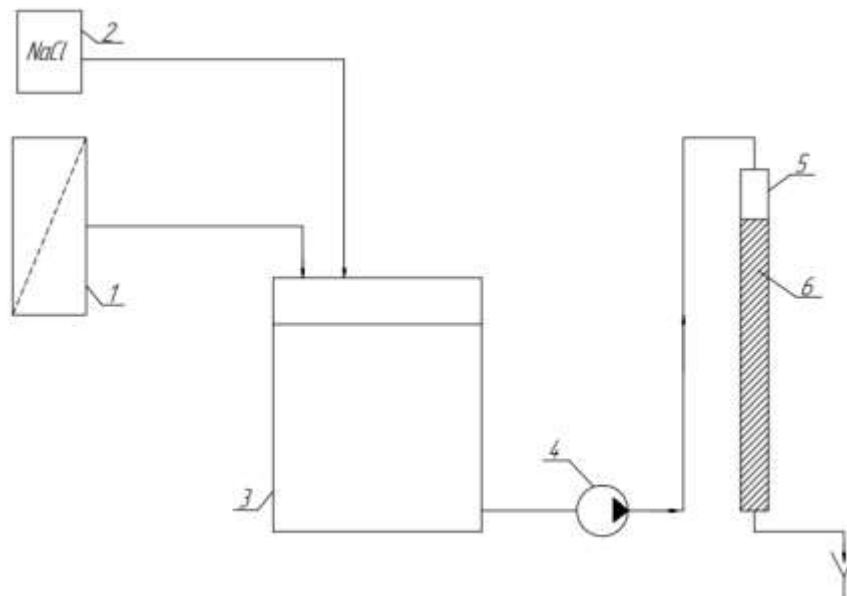


Рисунок 1. Технологическая схема экспериментального стенда: 1– вода, получаемая с помощью, обратноосмотической установки; 2 – поваренная соль; 3 – емкость для приготовления регенерирующего раствора; 4 – перистальтический насос; 5 – вертикальная колонна с неподвижным слоем катионита, оборудованная пробоотборниками; 6 – истощенный катионит

Стенд работает следующим образом: регенерирующий раствор подается в верхнюю часть колонны с постоянным расходом 1,8 л/ч. Постоянство расхода обеспечивается за счет перистальтического насоса. В процессе регенерации производится отбор проб в периодическом режиме для определения величины общей жесткости регенерирующего раствора, которая обусловлена наличием ионов Ca^{2+} . Определение общей жесткости отбираемых проб осуществляется с помощью комплексонометрического титрования трилоном Б.

При совмещении теоретических кривых, полученных в результате интегрирования выражения (5), и экспериментальных точек можно отметить, что распространение фронтов регенерации может быть удовлетворительно описано с помощью разработанной вероятностно-статической модели (рис.2).

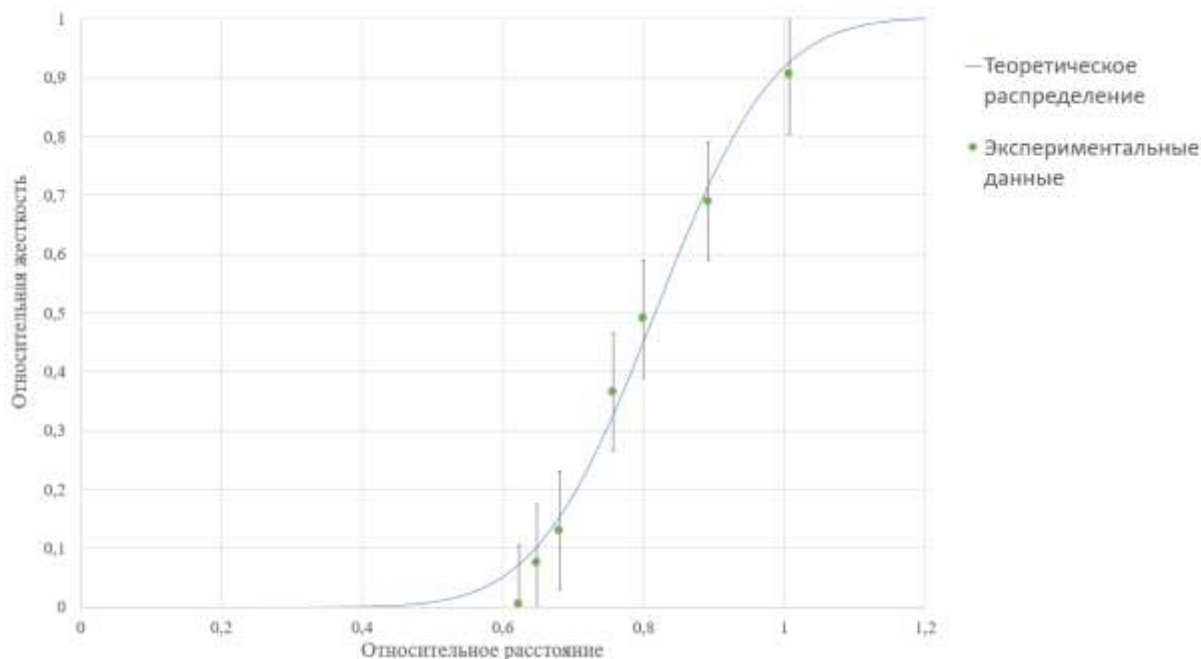


Рисунок 2. Сопоставление экспериментальных и теоретических фронтов регенерации

Разработанная модель позволяет оценить в рамках проведенного экспериментального исследования интенсивность случайных составляющих путем количественной оценки коэффициент продольной диффузии: $D = 4,2 * 10^{-6} \dots 4,5 * 10^{-6} \frac{\text{мм}^2}{\text{с}}$. В конечном итоге при расходах регенерирующего раствора $Q_0 = 1,8 - 2 \text{ м}^3/\text{ч}$ и высоте слоя ионита $L_0 = 1 - 1,2 \text{ м}$ расхождение между экспериментальными и расчетными значениями не превышает 15%.

Результаты экспериментального исследования подтверждают нарушение поршневой структуры движения фронта регенерации, поэтому важно учитывать диффузию при оценке времени регенерации фильтра. В противном случае часть смолы, расположенная в нижней части колонны, останется в истощенном состоянии, что приведет в последующем к сокращению фильтроцикла.

References

1. Павлов, Ю. Н. Применение современных методов очистки воды на ТЭЦ и котельных / Ю. Н. Павлов, В. С. Смирнов // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ "Нацразвитие": сборник избранных статей, Санкт-Петербург, 10–13 августа 2021 года. – Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования

Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2021. – С. 52-57.

2. Комарова И. В. Универсальный подход к расчету и оптимизации схем ионообменной водоподготовки // Сорбционные и хроматографические процессы. – т. 12(5). – 2019. – С. 683-692.

3. Ходотович С.В. Вероятностно-статистический метод расчета ионообменного процесса / С.В. Ходотович, А.Н. Гречушкин // Одиннадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. 24–27 сентября 2018 г., 2018. С. 523-525.

4. Лайпанов, Б. Ш. Современное состояние исследований кинетики и динамики ионного обмена / Б. Ш. Лайпанов // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2017. – Т. 1. – С. 247-255.

5. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники / Н.В. Кельцев. - М.: Химия, 1984. – 512с.

MEDICAL RESEARCH AND HEALTHCARE

UDC 519.17:573:616-036.22

Andreev I.R., Votyakova M.A., Zhuravleva M.A. Differential Equation Models in Epidemiology: SIR, SEIR

Модели дифференциальных уравнений в эпидемиологии: SIR, SEIR

Andreev Igor Removich,

Teacher, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Votyakova Marina Alexandrvna,

Teacher, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Zhuravleva Maria Andreevna,

Student, Analytical Control Group of Chemical Compounds, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Андреев Игорь Рэмович,

преподаватель, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва

Вотякова Марина Александровна,

преподаватель, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва

Журавлева Мария Андреевна,

студент, группа аналитического контроля химических соединений, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва

Abstract. *The study explores epidemic modeling via ODE systems, including the SIR model (Kermack, McKendrick, 1927), for outbreak analysis and prediction.*

Keywords: *SIR, SEIR, epidemic, incubation period, mathematical modeling.*

Аннотация. *Исследуется моделирование эпидемий с помощью систем ОДУ, включая модель SIR (Kermack, McKendrick, 1927), для анализа и прогнозирования вспышек.*

Ключевые слова: *SIR, SEIR, эпидемия, инкубационный период, математическое моделирование.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение

Простейшие дифференциальные модели описывают динамику инфекционного заболевания, разделяя популяцию на несколько групп и задавая скорость перехода между ними с помощью систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Данный подход позволяет исследовать механизм распространения инфекций, прогнозировать развитие эпидемий и оценивать эффективность карантинных мер.

1. Классическая модель SIR

Наиболее известной и фундаментальной является модель SIR (Kermack – McKendrick, 1927), в которой популяция постоянного размера *N* делится на три компартмента:

S (Susceptible) – восприимчивые к болезни индивиды;

I (Infectious) – инфицированные и заразные индивиды;

R (Recovered) – выздоровевшие (с приобретенным иммунитетом) или умершие.

Динамика системы описывается следующей системой ОДУ:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{I * S}{N}$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{I * S}{N} - \gamma I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I$$

где: β – коэффициент передачи, отражающий скорость заражения;

γ – скорость выздоровления (величина, обратная средней продолжительности инфекционного периода: $1/\gamma$).

Ключевым эпидемиологическим параметром модели является базовое репродуктивное число $R_0 = \beta / \gamma$. Эпидемия приобретает характер вспышки, если $R_0 > 1$.

Ограничения модели SIR:

- Упрощенные допущения о популяции: модель предполагает однородность и замкнутость популяции, что редко выполняется на практике.

- Отсутствие инкубационного периода: инфицированные становятся заразными мгновенно, что может приводить к завышению скорости распространения на ранних этапах.

- Пожизненный иммунитет: не учитывается возможность повторного заражения.

- Игнорирование пространственной структуры: не учитывается влияние миграции и плотности населения.

2. Процесс работы с моделью

Типичный процесс математического моделирования включает несколько этапов:

1. Сбор данных: используются временные ряды официальной статистики (ежедневные новые случаи, данные о выздоровлениях).

2. Численное решение системы: система ОДУ решается численными методами.

3. Подгонка параметров: с помощью методов оптимизации параметры β и γ подбираются таким образом, чтобы модельная кривая наилучшим образом аппроксимировала реальные данные.

3. Усовершенствованная модель SEIR

Для анализа эпидемий с выраженным инкубационным периодом (например, COVID-19) применяется модель SEIR, являющаяся развитием модели SIR. Она вводит дополнительную группу:

E (Exposed) – инфицированные, но еще не заразные индивиды (находящиеся в латентном периоде).

Система уравнений модифицируется следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\beta \frac{I * S}{N} \\ \frac{dE}{dt} &= \beta \frac{I * S}{N} - \sigma E \\ \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I\end{aligned}$$

Преимущества модели SEIR:

- Учет инкубационного периода: позволяет более точно отразить биологию многих заболеваний и избежать завышения скорости раннего распространения.
- Повышение точности прогнозов: модель лучше предсказывает пик заболеваемости и общую динамику эпидемии.
- Оценка эффективности мер: предоставляет инструмент для анализа эффективности мер, направленных на выявление и изоляцию бессимптомных носителей.

Заключение

Математическое моделирование является мощным инструментом для анализа и прогнозирования распространения инфекционных заболеваний. Классическая модель SIR служит базой для понимания фундаментальных принципов, в то время как более сложные модели, такие как SEIR, позволяют учесть дополнительные биологические и социальные факторы, повышая адекватность прогнозов и обеспечивая научную основу для принятия управленческих решений в сфере здравоохранения.

References

1. Янчевская Е.Ю., Меснянкина О.А. Математическое моделирование и прогнозирование в эпидемиологии инфекционных заболеваний. – 2019. – № 3. – С. 338–344.
2. Кольцова Э.М., Куркина Е.С., Васецкий А.М. Математическое моделирование эпидемий коронавируса COVID-19 в Москве. – 2019. – № 1. – С. 99–105.
3. Kermack W.O., McKendrick A.G. A contribution to the mathematical theory of epidemics // Proceedings of the Royal Society A. – 1927. – Vol. 115, No. 772. – P. 700–721.

UDC 615.272

Berezkina E.D., Ezhova S.V. Semaglutide in clinical practice: systematic analysis of therapeutic effectiveness, safety profile, and strategic applications

Семаглутид в клинической практике: систематический анализ терапевтической эффективности, профиля безопасности и стратегических перспектив применения

Berezkina Elena Dmitrievna,

student. "Private Educational Institution of Higher Education Reaviz Medical University", Samara

Ezhova Serafima Viktorovna,

student. "Private Educational Institution of Higher Education Medical University Reaviz", Samara

Supervisor: **Makova Elena Viktorovna**

Candidate of Medical Sciences,

Associate Professor of the Department of Internal Medicine

Березкина Елена Дмитриевна,

студентка. «Частное учреждение образовательная организация высшего образования

„Медицинский университет „Реавиз“, г. Самара

Ежова Серафима Викторовна,

студентка. «Частное учреждение образовательная организация высшего образования

„Медицинский университет „Реавиз“, г. Самара

Научный руководитель: Макова Елена Викторовна

Кандидат медицинских наук, доцент кафедры внутренних болезней

Abstract. *Glucagon-like peptide-1 receptor agonists (GLP-1RAs) have become key drugs in the treatment strategy for type 2 diabetes (T2DM), which is focused not only on glycemic control, but also on improving cardiometabolic outcomes. Semaglutide, which has a prolonged half-life, demonstrates the most pronounced effects in controlling glycemia and body weight. The purpose of this analytical review is to provide a comprehensive assessment of the clinical efficacy, risks, and prospects of semaglutide based on the latest randomized clinical trials (RCTs) and meta-analyses. This systematic review confirms the superiority of semaglutide over other GLP-1 receptor agonists and standard treatment regimens in achieving target glycated hemoglobin (HbA1c) levels and reducing body weight (by an average of -1.5% and -5-8 kg, respectively, depending on the dose). Significant cardiovascular benefits of the drug have been established, including a reduction in the risk of major adverse cardiovascular events.*

Keywords: *semaglutide, GLP-1 receptor agonists, type 2 diabetes, cardiovascular outcomes, weight loss, safety of therapy, metabolic syndrome.*

Аннотация. *Агонисты рецепторов глюкагоноподобного пептида-1 (арГПП-1) стали ключевыми препаратами в стратегии лечения сахарного диабета 2 типа (СД2), ориентированной не только на гликемический контроль, но и на улучшение кардиометаболических исходов. Семаглутид, обладающий продлённым периодом полувыведения, демонстрирует наиболее выраженные эффекты в контроле гликемии и массы тела. Целью данного аналитического обзора является комплексная оценка клинической эффективности, рисков и перспектив семаглутида на основе данных последних рандомизированных клинических исследований (РКИ) и мета-анализов. Проведённый систематический анализ подтверждает превосходство семаглутида перед другими арГПП-1 и стандартными схемами лечения в достижении целевых показателей гликированного гемоглобина (HbA1c) и снижении массы тела (в среднем на -1,5% и -5-8 кг соответственно в зависимости от дозы). Установлены значимые кардиоваскулярные преимущества препарата, включающие снижение риска основных неблагоприятных сердечно-сосудистых событий (MACE) на 26% (SUSTAIN-6) и 20% (SELECT) у пациентов с СД2 и без него, но с кардиоваскулярной патологией. Профиль безопасности характеризуется преобладанием дозозависимых и транзиторных желудочно-кишечных нежелательных явлений (тошнота – 15-20%, диарея). Выявлены потенциальные риски, требующие мониторинга: редкие случаи диабетической ретинопатии (чаще на фоне*

быстрого снижения гликемии), холецистита и панкреатита. Перспективы клинического применения семаглутида расширяются за счёт изучения его эффектов при неалкогольной жировой болезни печени (НАЖБП), ожирении без СД2, нейродегенеративных заболеваниях и разработки пероральной формы. Таким образом, семаглутид представляет собой высокоэффективный агент с доказанными метаболическими и кардиопротективными свойствами, однако его назначение требует индивидуальной оценки рисков и информированного выбора пациента.

Ключевые слова: семаглутид, агонисты рецепторов ГПП-1, сахарный диабет 2 типа, сердечно-сосудистые исходы, снижение массы тела, безопасность терапии, метаболический синдром.

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент.
Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Терапевтическая эффективность: гликемический контроль и антропометрические параметры

Данные программ рандомизированных контролируемых исследований (РКИ) *SUSTAIN* (для подкожной формы) и *PIONEER* (для пероральной формы) последовательно демонстрируют превосходство семаглутида.

Так, применение семаглутида в дозе 1,0 мг подкожно еженедельно обеспечивает снижение уровня гликированного гемоглобина (HbA1c) в среднем на 1,5–1,8% от исходного уровня. Это на 0,3–0,5% эффективнее по сравнению с дулаглутидом и лираглутидом в эквивалентных дозах [2, с.7].

Важно отметить, что указанный эффект достигается с низким риском гипогликемии — это связано с глюкозозависимым механизмом действия препарата. Уникальной чертой семаглутида является дозозависимое значительное снижение массы тела.

В исследованиях серии *STEP* у пациентов с ожирением без сахарного диабета 2-го типа (СД2) применение семаглутида в дозе 2,4 мг в неделю привело к снижению массы тела в среднем на 14,9% за 68 недель. Этот результат в разы превышает показатели в группах, где проводилась только модификация образа жизни, и превосходит эффекты других антагонистов.

Полученные данные позволяют рассматривать семаглутид не только как сахароснижающий препарат, но и как мощный метаболический агент, воздействующий на ключевые патофизиологические звенья СД2 и ожирения.

Кардиоваскулярные исходы и безопасность

Результаты исследования *SUSTAIN 6* и последующего мета-анализа стали поворотным моментом: семаглутид продемонстрировал статистически значимое снижение риска основных неблагоприятных сердечно-сосудистых событий (MACE: нефатальный инфаркт миокарда, нефатальный инсульт, сердечно-сосудистая смерть) на 26% у пациентов с СД2 и высоким сердечно-сосудистым риском [6].

Кардиопротективный эффект подтверждён в исследовании *SELECT*: у пациентов с

сердечно-сосудистой патологией и избыточной массой тела, но без диабета, применение семаглутида (2,4 мг) привело к снижению риска MACE на 20%. Это открывает новую эру применения агонистов рецепторов глюкагоноподобного пептида-1 (арГПП-1) вне контекста гликемии для кардиопротекции [6,с.45].

Можно предположить, что кардиоваскулярные преимущества семаглутида обусловлены:

- улучшением метаболических параметров;
- прямым противовоспалительным и антиатерогенным действием на сосудистую

стенку.

Профиль безопасности

В целом профиль безопасности семаглутида благоприятен.

Наиболее частые нежелательные явления носят гастроинтестинальный характер:

- тошнота;
- рвота;
- диарея.

Как правило, эти симптомы транзиторны, а их частота снижается при медленном титровании дозы.

Серьёзные побочные эффекты редки, однако требуют внимания:

- незначительное повышение частоты холецистита (вероятно, вследствие снижения моторики жёлчного пузыря и изменения состава желчи);
- учащение случаев диабетической ретинопатии у пациентов с высоким исходным риском (объясняется быстрым снижением гликемии, так называемым *early worsening*);
- риск панкреатита и медуллярного рака щитовидной железы в исследованиях не превышал таковой в группах сравнения.

Таким образом, для эффективного старта терапии необходимо:

1. Активно разъяснять пациентам высокую вероятность преходящих желудочно-кишечных симптомов.
2. Методично повышать дозу по схеме.

Семаглутид, как агонист рецепторов ГПП-1, оказывает плейотропные эффекты на различные органы и системы, приводя к комплексным метаболическим и кардиоваскулярным улучшениям.

Перспективы и стратегические направления клинического применения

За пределами СД2 и ожирения активно исследуется потенциал семаглутида при:

- неалкогольной жировой болезни печени (НАЖБП);
- неалкогольном стеатогепатите (НАСГ).

В ранних исследованиях препарат показал уменьшение фиброза печени и снижение активности воспалениях[6,с.50].

Нейропротективные свойства, продемонстрированные в доклинических моделях болезни Альцгеймера и Паркинсона, открывают новое поле для клинических испытаний. Они фокусируются на влиянии семаглутида на нейровоспаление и трофику нейронов .

Упрощение режима дозирования за счёт разработки пероральной формы (в комбинации с носителем для улучшения всасывания) значительно повышает приверженность лечению и делает терапию приемлемой для большего круга пациентов.

Ключевыми задачами, ограничивающими повсеместное применение, остаются:

- оптимизация стратификации пациентов — для максимизации пользы и минимизации рисков;

- решение экономических вопросов, связанных с высокой стоимостью терапии, — требует развития фармакоэкономических моделей для обоснования долгосрочной клинической и бюджетной эффективности.

Заключение

Проведённый анализ позволяет заключить, что семаглутид представляет собой значимый терапевтический прорыв в области метаболической медицины. Препарат сочетает в себе:

- мощный гликемический контроль;
- выраженный эффект в снижении массы тела;
- доказанное кардиопротективное действие.

Это в полной мере соответствует современным целям лечения пациентов с СД2 и сопутствующими кардиометаболическими нарушениями.

Несмотря на предсказуемые и в большинстве случаев управляемые желудочно-кишечные побочные эффекты, применение семаглутида требует:

- тщательного отбора пациентов (особенно с высоким риском ретинопатии и холелитиаза);
- готовности к медленному титрованию дозы.

References

1. Аметов, А. С. Сердечно-сосудистая безопасность и преимущества современных сахароснижающих препаратов: анализ данных исследований EMPA-REG OUTCOME, LEADER, SUSTAIN-6 /А. С. Аметов, Е. К. Карпова // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. — 2018. — Т. 14, № 1. — С. 94–102

2. Анциферов, М. Б. Новые возможности терапии сахарного диабета 2 типа: фокус на семаглутиде / М. Б. Анциферов, Е. В. Гасилина // Клиническая фармакология и терапия. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 7–14.
3. Арода, В. Р. Пероральный семаглутид в сравнении с подкожным лираглутидом и плацебо при сахарном диабете 2 типа (Исследование PIONEER 4) / В. Р. Арода, С. К. Бэйн, К. Мариотти [и др.] // Фармакотерапия сердечно сосудистых и метаболических заболеваний. — 2020. — Т. 2, № 1. — С. 33–44.
4. Галстян, Г. Р. Современные подходы к медикаментозной терапии ожирения: место агонистов рецепторов ГПП 1 / Г. Р. Галстян, А. Е. Токмакова // Ожирение и метаболизм. — 2023. — Т. 20, № 1. — С. 5–15.
5. Линкофф, А. М. Семаглутид и сердечно сосудистые исходы при ожирении без сахарного диабета (Исследование SELECT) / А. М. Линкофф, К. Браун Франклин, Р. Диас [и др.] // Кардиология. — 2024.
6. Ньюсом, П. Н. Влияние семаглутида на ферменты печени и маркеры воспаления у пациентов с СД2 и/или ожирением / П. Н. Ньюсом, Д. Л. Бхатт, Дж. Б. Буссе [и др.] // Клиническая гепатология. — 2021. — Т. 13, № 3. — С. 45–52.

UDC 616.155.194:616-005.1-08

Fazletdinov A.F., Mukhtarov G.R., Danilovtseva A.V. Severe acute posthemorrhagic anemia: modern concepts of pathophysiology, transfusion support and erythropoiesis recovery

Острая постгеморрагическая анемия тяжелой степени: современные представления о патофизиологии, трансфузионной поддержке и восстановлении эритропоэза

Fazletdinov Amir Fuadovich,

Student, Ural State Medical University, Yekaterinburg.

Mukhtarov German Ravilevich,

Student, Ural State Medical University, Yekaterinburg.

Danilovtseva Anastasia Vitalevna,

Assistant of the Department of Biochemistry, Ural State Medical University, Yekaterinburg.

Фазлетдинов Амир Фуадович,

студент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Екатеринбург.

Мухтаров Герман Равильевич,

студент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Екатеринбург.

Даниловцева Анастасия Витальевна,

ассистент кафедры биохимии, ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Екатеринбург.

Abstract. *The article discusses severe acute posthemorrhagic anemia caused by massive blood loss during trauma, surgery, gastrointestinal and obstetric bleeding. Current data on tissue hypoxia, coagulopathy, endothelial dysfunction and impaired erythropoiesis are analyzed. Modern approaches to intensive care, including damage control resuscitation, restrictive transfusion strategies, correction of coagulopathy and patient blood management are reviewed. The study demonstrates that effective treatment requires a combination of hemostatic, transfusion and rehabilitation-oriented strategies.*

Keywords: *posthemorrhagic anemia, massive blood loss, hemorrhagic shock, coagulopathy, erythropoiesis, transfusion, hepcidin, patient blood management.*

Аннотация. *В данной статье рассматривается проблема тяжелой острой постгеморрагической анемии, возникающей вследствие массивной кровопотери при травмах, хирургических вмешательствах, желудочно-кишечных и акушерских кровотечениях. Проанализированы современные данные о механизмах тканевой гипоксии, коагулопатии, эндотелиальной дисфункции и нарушении эритропоэза. Рассматриваются современные подходы к интенсивной терапии, включающие damage control resuscitation, рестриктивную трансфузионную тактику, коррекцию коагулопатии и концепцию patient blood management. В результате установлено, что успешное лечение пациентов требует комплексного сочетания гемостатической, трансфузионной и реабилитационной терапии.*

Ключевые слова: *постгеморрагическая анемия, массивная кровопотеря, геморрагический шок, коагулопатия, эритропоэз, гемотрансфузия, гепсидин, patient blood management.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент.
Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

ВВЕДЕНИЕ

Острая постгеморрагическая анемия тяжелой степени развивается при быстрой потере значительного объема крови и представляет собой клинко-патофизиологический синдром, в котором сочетаются гиповолемия, снижение доставки кислорода к тканям, нарушения гемостаза и вторичное угнетение кроветворения [1-4]. В реальной клинической практике наиболее частыми контекстами ее формирования являются политравма, желудочно-кишечные кровотечения, акушерские кровотечения, осложненные хирургические вмешательства и ятрогенные кровопотери в условиях реанимации [2, 5, 6].

Традиционное представление о постгеморрагической анемии как о простом снижении гемоглобина в настоящее время признано недостаточным. Исход пациента определяется не только абсолютным уровнем Hb, но и скоростью кровопотери, резервами сердечно-сосудистой системы, эффективностью микроциркуляции, выраженностью коагулопатии, гипотермии, ацидоза, а также способностью костного мозга восстановить эритроцитарный росток после купирования кровотечения [1, 3, 7]. Именно поэтому современные рекомендации рассматривают массивное кровотечение и острую анемию в рамках единой концепции damage control resuscitation и patient blood management (PBM) [3, 8, 9].

Высокая летальность при критическом кровотечении, риски переливания компонентов крови, ограниченность донорских ресурсов и данные о длительном персистировании анемии после тяжелой травмы делают данную тему особенно актуальной для обзора [4, 10].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Тип исследования: обзор литературы. Для написания обзора проанализированы современные клинические рекомендации, систематические обзоры, нарративные обзоры и оригинальные исследования, опубликованные преимущественно в 2015-2026 гг. Поиск проводился в базах PubMed и PubMed Central, а также по материалам международных рекомендаций по management of major bleeding, massive transfusion и patient blood management. Использованы ключевые слова: «acute posthemorrhagic anemia», «massive blood loss», «major hemorrhage», «massive transfusion», «trauma-induced coagulopathy», «restrictive transfusion», «patient blood management», «iron deficiency», «erythropoiesis», «hepcidin». В обзор включались публикации, описывающие механизмы острой кровопотери, трансфузионную поддержку, коррекцию коагулопатии, а также исследования, посвященные восстановлению гемоглобина и эритропоэза после тяжелой травмы и кровотечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Тяжелая острая постгеморрагическая анемия формируется в два взаимосвязанных этапа. На первом этапе доминируют непосредственные последствия кровопотери: уменьшение венозного возврата, ударного объема и сердечного выброса, активация симпатoadреналовой системы, централизация кровообращения и нарастающая тканевая гипоксия [1, 2]. На втором этапе присоединяются гемодилюция, коагулопатия, дисфункция эндотелия и системный воспалительный ответ, которые усугубляют дефицит доставки кислорода даже после частичного восстановления объема циркулирующей крови [3, 4].

Патофизиологические механизмы массивной кровопотери

Ключевым звеном ранней декомпенсации является несоответствие между доставкой и потреблением кислорода. При быстром уменьшении массы циркулирующих эритроцитов тканевая гипоксия развивается раньше, чем успевают сформироваться лабораторные признаки выраженной анемии. Поэтому клиническая тяжесть состояния может опережать снижение Hb, особенно в первые часы после кровотечения [1, 11]. Лактацидоз, дефицит оснований и нарушения микроциркуляции отражают глубину шока лучше, чем изолированная концентрация гемоглобина [11].

Современные представления о trauma-induced coagulopathy подчеркивают роль эндотелиального повреждения, активации протеина C, гиперфибринолиза, истощения фибриногена, тромбоцитарной дисфункции и дилуционной коагулопатии [3, 5, 12]. Сочетание коагулопатии, ацидоза и гипотермии формирует так называемую «летальную триаду», резко увеличивающую риск продолжающегося кровотечения и смерти [1, 3]. Отдельное значение имеет трансфузионно-индуцированная гипокальциемия вследствие цитратной нагрузки, которая ухудшает сократимость миокарда и гемостаз [3, 13].

Нарушение эритропоеза и обмена железа после кровопотери

После остановки кровотечения проблема не исчерпывается восполнением эритроцитарной массы. У пациентов с тяжелой травмой и критическими состояниями нередко формируется персистирующая постгеморрагическая анемия, связанная с угнетением костномозгового эритропоеза, гиперкатехоламинемией, повышением провоспалительных цитокинов и нарушением метаболизма железа [10, 14, 15]. Воспаление индуцирует синтез гепсидина, что приводит к функциональному дефициту железа: железо сохраняется в макрофагах и гепатоцитах, но становится менее доступным для эритроидных предшественников [14-17].

Проспективные наблюдения показали, что после тяжелой травмы анемия сохраняется у большинства пациентов при выписке, а у части больных умеренно-

тяжелая анемия может сохраняться в течение нескольких месяцев. Персистирование анемии ассоциировано с большей длительностью пребывания в ОИТ, большим объемом перелитых эритроцитов и более высокой частотой инфекционных осложнений [10]. Эти данные подтверждают, что восстановление гемоглобина после массивной кровопотери является самостоятельной клинической задачей, а не только маркером пережитого шока.

Современные стратегии острой трансфузионной поддержки

В острой фазе лечения приоритетом является немедленная остановка кровотечения и ранняя активация протокола массивного кровотечения. Современные рекомендации поддерживают концепцию damage control resuscitation, включающую ограничение избыточной кристаллоидной инфузии, раннее использование сбалансированной гемокомпонентной терапии, поддержание нормотермии и коррекцию метаболических нарушений [1, 3, 5, 8]. Для ряда категорий пациентов оправдан ранний прием транексамовой кислоты, особенно при травме и продолжающемся кровотечении [1, 5].

Подход к переливанию эритроцитарной массы должен быть не только лабораторным, но и клиничко-физиологическим. Для гемодинамически стабильных госпитализированных взрослых пациентов международные рекомендации AABB поддерживают рестриктивную стратегию с рассмотрением переливания при Hb < 70 г/л; в отдельных клинических ситуациях применяются более высокие пороги, например у больных после кардиохирургических операций или при активной ишемии миокарда [9]. Однако при продолжающемся кровотечении, геморрагическом шоке и нарушении перфузии решение о трансфузии должно основываться на совокупности признаков: уровне Hb, гемодинамике, динамике лактата, объеме кровопотери, необходимости вазопрессоров и признаках неадекватной доставки кислорода [8, 11, 18].

Не менее важна целенаправленная коррекция коагулопатии. Европейские рекомендации подчеркивают необходимость ранней оценки фибриногена, тромбоцитов и viscoelastic-тестирования, когда оно доступно, поскольку именно гипофибриногенемия часто является первым лабораторным проявлением критического кровотечения [1, 5, 12]. Оптимизация кальция, температуры и кислотно-основного состояния должна рассматриваться как обязательная часть лечения тяжелой постгеморрагической анемии, а не как второстепенное сопровождение [1, 3].

Восстановление гемоглобина в рамках patient blood management

После достижения гемостаза акцент смещается на сокращение дальнейших потерь крови и поддержку собственного кроветворения пациента. Идеология RBM включает три ключевых направления: оптимизацию массы эритроцитов, минимизацию

кровопотери и повышение толерантности пациента к анемии [8]. На практике это означает ограничение диагностической флеботомии, своевременное выявление железодефицита, коррекцию дефицита железа и витаминов, лечение инфекции и контроль продолжающихся скрытых кровопотерь [8, 17, 19].

Внутривенные препараты железа приобретают все большее значение в тех ситуациях, когда необходимо быстрое восполнение железа или когда оральная терапия малоэффективна из-за воспаления, плохой переносимости или недостаточной скорости ответа [17, 19, 20]. Хотя переливание эритроцитов быстрее повышает Hb в остром периоде, оно не заменяет коррекцию дефицита железа и не восстанавливает нарушенный эритропоэз. Поэтому после стабилизации состояния рационально сочетать ограничительную трансфузионную тактику с патогенетической коррекцией железодефицита.

Перспективным направлением остается фармакологическая модуляция гепсидина, воспаления и стресс-опосредованного угнетения эритроидного ростка. Экспериментальные и клинические данные показывают, что именно длительная гиперкатехоламинемия и воспаление поддерживают анемию после тяжелой травмы даже при нормализации сывороточного железа [14-16]. Это открывает возможности для более адресной реабилитации пациентов в подостром периоде.

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, тяжелая острая постгеморрагическая анемия должна рассматриваться как динамический синдром, в котором ранняя фаза шока и коагулопатии сменяется фазой нарушенного восстановления гемопоэза. Подобный взгляд позволяет уйти от упрощенной модели «кровопотеря - низкий Hb - переливание» и объясняет, почему часть больных остается анемичной в течение недель и месяцев после успешного гемостаза [10, 14].

Особого внимания заслуживает то обстоятельство, что переливание эритроцитов остается жизнеспасающей терапией, но не является универсальным решением. Избыточная гемотрансфузия ассоциирована с перегрузкой объемом, иммуномодуляцией, риском инфекционных осложнений и не устраняет воспалительно-опосредованные блоки эритропоэза [9, 10, 18]. Поэтому современная стратегия должна сочетать ранний гемостаз и сбалансированную гемокомпонентную терапию с максимально бережным отношением к собственным ресурсам крови пациента.

С практической точки зрения наиболее оправдан интегрированный подход, в котором решения принимаются на основании клинической картины, лабораторных показателей и контекста кровотечения. Для хирургии и травматологии это означает раннюю активацию протоколов массивного кровотечения, использование

антифибринолитиков по показаниям, контроль фибриногена и кальция, а после стабилизации - последовательное ведение пациента в логике PBM [1, 5, 8].

Ограничением современной доказательной базы остается гетерогенность клинических сценариев: политравма, гастроинтестинальные и акушерские кровотечения, послеоперационная кровопотеря и критические состояния различаются по структуре коагулопатии, темпам анемизации и возможностям мониторинга. Тем не менее общим остается принцип: лечение тяжелой постгеморрагической анемии не должно сводиться к достижению произвольного уровня Hb, а должно быть направлено на восстановление перфузии, гемостаза и эффективного эритропоэза.

ВЫВОДЫ

1. Острая постгеморрагическая анемия тяжелой степени представляет собой многофакторный синдром, включающий не только потерю эритроцитарной массы, но и гиповолемию, шок, коагулопатию, воспалительный ответ и вторичное угнетение эритропоэза.

2. Тяжесть состояния пациента определяется не только концентрацией гемоглобина, но и скоростью кровопотери, выраженностью тканевой гипоперфузии, нарушениями микроциркуляции, гипотермией, ацидозом и гипокальциемией.

3. Современная острая тактика должна базироваться на раннем гемостазе, активации протокола массивного кровотечения, ограничении избыточной кристаллоидной инфузии, рациональной гемокомпонентной терапии и целенаправленной коррекции коагулопатии.

4. Рестриктивная стратегия переливания эритроцитов у гемодинамически стабильных пациентов является обоснованной, однако при продолжающемся кровотечении решения должны приниматься с учетом клинико-физиологических признаков неадекватной доставки кислорода.

5. После стабилизации пациента ведение постгеморрагической анемии должно продолжаться в рамках patient blood management, включая поиск дефицита железа, минимизацию ятрогенной кровопотери и поддержку восстановления эритропоэза.

References

1. Hemorrhagic shock / J.W. Cannon // New England Journal of Medicine. – 2018. – Vol. 378, No. 4. – P. 370–379. URL: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMra1705649>
2. The European guideline on management of major bleeding and coagulopathy following trauma: sixth edition / R. Rossaint, B. Bouillon, V. Cerny [et al.] // Critical Care. – 2023. – Vol. 27. – Art. 80. URL: <https://ccforum.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13054-023-04327-7>

3. Management of severe peri-operative bleeding: guidelines from the European Society of Anaesthesiology and Intensive Care, second update 2022 / S. Kietaihl, A. Ahmed, A. Afshari [et al.] // European Journal of Anaesthesiology. – 2023. – Vol. 40, No. 4. – P. 226–304. URL: https://journals.lww.com/ejanaesthesiology/fulltext/2023/04000/management_of_severe_peri_operative_bleeding.3.aspx

4. Trauma-induced coagulopathy / E.E. Moore, D.J. Neal, M.J. Cohen [et al.] // Nature Reviews Disease Primers. – 2021. – Vol. 7. – Art. 30. URL: <https://www.nature.com/articles/s41572-021-00264-3>

5. Update on the pathophysiology and management of acute trauma hemorrhage and trauma-induced coagulopathy based upon viscoelastic testing / M. Maegele // Clinical and Experimental Emergency Medicine. – 2024. – Vol. 11. – P. 1–12. URL: <https://www.ceemjournal.org/>

6. Patient blood management guideline for adults with critical bleeding / B. Mitra, E. Burns, D. Arnold [et al.] // Medical Journal of Australia. – 2024. – Vol. 221. – P. 1–12. URL: <https://www.mja.com.au/>

7. Alternative blood transfusion triggers: a narrative review / A. Arynov, A. Trentino, M. Farmer [et al.] // BMC Anesthesiology. – 2024. – Vol. 24. – Art. 82. URL: <https://bmcanesthesiol.biomedcentral.com/>

8. Patient blood management / National Blood Authority Australia. – Updated 27 March 2024. URL: <https://www.blood.gov.au/pbm-guidelines>

9. Red Blood Cell Transfusion: 2023 AABB International Guidelines / J.L. Carson, R.G. Triulzi, J.K. Ness [et al.] // JAMA. – 2023. – Vol. 330, No. 19. – P. 1892–1902. URL: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2812008>

10. Anemia Recovery after Trauma: A Longitudinal Study / L.S. Kelly, J.A. Munley, C.G. Apple [et al.] // Journal of Trauma and Acute Care Surgery. – 2023. – Vol. 94. – P. 347–355.

11. Acute anemia / R.B. Killeen, J.M. Scott // StatPearls. – Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025.

12. Haemostatic resuscitation in patients with trauma-induced coagulopathy / J. Kwon, S. Rhee, Y. Jo // Acute and Critical Care. – 2026. – Vol. 41. – P. 1–14.

13. Prolonged chronic stress and persistent iron dysregulation prevent anemia recovery following trauma / C.G. Apple, J.A. Munley, A. Mikhail [et al.] // Shock. – 2021. – Vol. 56, No. 1. – P. 123–131.

14. Adrenergic modulation of erythropoiesis after trauma / J.A. Munley, P.A. Efron, P.K. Bihorac [et al.] // Frontiers in Physiology. – 2022. – Vol. 13. – Art. 859103.

15. Anemia and iron-restricted erythropoiesis in traumatic critical illness / K. Pirie, P. Myles, E. Wood // *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*. – 2016. – Vol. 80, No. 3. – P. 538–545.

16. Hepcidin in trauma: linking injury, inflammation, and anemia / K.C. Sihler, K. Raghavendran, M. Westerman [et al.] // *Journal of Trauma*. – 2010. – Vol. 69, No. 4. – P. 831–837.

17. Characterization of erythropoietin and hepcidin in the regulation of persistent injury-associated anemia / I.G. Alamo, K.B. Kannan, M.A. Smith [et al.] // *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*. – 2016. – Vol. 81, No. 4. – P. 705–712.

18. Persistent inflammation and anemia among critically ill septic patients / T.J. Loftus, J.C. Mira, J.A. Stortz [et al.] // *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*. – 2019. – Vol. 86, No. 2. – P. 260–267.

19. IV iron formulations and use in adults / L. Van Doren, A. DeLoughery // *Hematology*. – 2023. – Vol. 2023, No. 1. – P. 622–629.

20. Expert consensus guidelines: intravenous iron uses, formulations, and diagnostic and management strategies / L. Van Doren, T.G. DeLoughery, M. Auerbach [et al.] // *American Journal of Hematology*. – 2024. – Vol. 99. – P. 1–18.

21. Management of iron-deficiency anemia following acute gastrointestinal hemorrhage: a narrative analysis and review / A. Lanas, D. Carrera-Lasfuentes, I. Polo-Tomás [et al.] // *Journal of Gastroenterology and Hepatology*. – 2023. – Vol. 38. – P. 1240–1248.

22. AGA Clinical Practice Update on Management of Iron Deficiency Anemia / T.G. DeLoughery, M. Auerbach, J.A. Adamson [et al.] // *Clinical Gastroenterology and Hepatology*. – 2024. – Vol. 22. – P. 1444–1453.

23. Pathophysiology of traumatic hemorrhagic shock / S.G. Mutschler, T. Paffrath, C. Wölfl [et al.] // *Transfusion Medicine and Hemotherapy*. – 2019. – Vol. 46. – P. 137–145.

24. Restriction of phlebotomy in the intensive care unit: impact on anemia and transfusion / M.A. Warner, S.K. Hanson, A.M. Schulte [et al.] // *Critical Care Medicine*. – 2021. – Vol. 49. – P. e123–e132.

25. Practical anemia bundle and hemoglobin recovery in critical illness / M.A. Warner, D.A. Kor, R.J. Stubbs [et al.] // *JAMA Network Open*. – 2025. – Vol. 8. – Art. e251234.

UDC 615.825

Ivanov N.A., Avdeeva O.V. Opportunities to use physical therapy and physical therapy in the rehabilitation of SVO participants in Sochi

Возможности использования средств физиотерапии и ЛФК в реабилитации участников СВО в городе Сочи

Ivanov Nikolai Aleksandrovich,

Lecturer, Department of Physical Education and Sports, Sochi State University,
Director of the Educational and Health Center, Sochi.

Avdeeva Olga Vasilyevna,

Lecturer, University College of Economics and Technology, Sochi State University, Sochi.

Иванов Николай Александрович,

Преподаватель кафедры физической культуры и спорта Сочинского государственного университета, директор учебно-оздоровительного центра, г. Сочи.

Авдеева Ольга Васильевна,

Преподаватель Университетского экономико-технологического колледжа Сочинского государственного университета, г. Сочи.

Abstract. *The aim of the study is to theoretically substantiate the possibilities of using physiotherapy and therapeutic physical culture in the system of rehabilitation of participants of a special military operation based on the sanatorium-resort complex of Sochi. The research methods were the analysis and synthesis of scientific literature, systematic and comparative analysis, generalization of domestic and foreign experience in the rehabilitation of persons with combat trauma. As a result of the study, the author systematized the main physiotherapy methods and physical therapy facilities used for various nosological forms of combat injuries, identified the natural, climatic and infrastructural advantages of Sochi as a rehabilitation base. The author concludes that there is a high potential for integrating physical treatment methods into multidisciplinary recovery programs for SVR participants, taking into account the unique resort resources of the Black Sea coast.*

Keywords: *physiotherapy, therapeutic physical culture, rehabilitation of participants of SVO, combat trauma, sanatorium treatment, Sochi (resort), multidisciplinary rehabilitation, climate therapy, PTSD, kinesotherapy.*

Аннотация. *Цель исследования – теоретически обосновать возможности применения средств физиотерапии и лечебной физической культуры в системе реабилитации участников специальной военной операции на базе санаторно-курортного комплекса города Сочи. Методами исследования послужили анализ и синтез научной литературы, системный и сравнительный анализ, обобщение отечественного и зарубежного опыта реабилитации лиц с боевой травмой. В результате исследования автором систематизированы основные физиотерапевтические методы и средства ЛФК, применяемые при различных нозологических формах боевых повреждений, выявлены природно-климатические и инфраструктурные преимущества Сочи как реабилитационной базы. Автором сделан вывод о высоком потенциале интеграции физических методов лечения в мультидисциплинарные программы восстановления участников СВО с учётом уникальных курортных ресурсов черноморского побережья.*

Ключевые слова: *физиотерапия, лечебная физическая культура, реабилитация участников СВО, боевая травма, санаторно-курортное лечение, город Сочи (курорт), мультидисциплинарная реабилитация, климатотерапия, ПТСР, кинезотерапия.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент.
Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение

Специальная военная операция, проводимая Российской Федерацией с февраля 2022 года, поставила перед отечественной медициной задачи, масштаб которых сложно переоценить. Тысячи военнослужащих ежегодно возвращаются из зоны боевых действий с разнообразными повреждениями: минно-взрывными травмами, огнестрельными ранениями, черепно-мозговыми травмами, ампутациями конечностей, а также с выраженными психоэмоциональными расстройствами, среди которых доминирующее место занимает посттравматическое стрессовое расстройство (ПТСР). [1]

Всё это, безусловно, формирует колоссальную нагрузку на систему медицинской реабилитации страны и требует не просто наращивания её мощностей, но и качественного пересмотра методологических подходов к восстановительному лечению.

Цель исследования – теоретически обосновать возможности и перспективы применения средств физиотерапии и лечебной физической культуры в реабилитации участников СВО с учётом специфики санаторно-курортной базы города Сочи.

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые проведён комплексный теоретический анализ возможностей применения физиотерапии и ЛФК в реабилитации участников СВО применительно к конкретному курортному региону – городу Сочи, – с учётом его уникальных природных факторов, санаторно-курортной инфраструктуры и особенностей современной боевой травмы.

Теоретическая значимость исследования заключается в авторской систематизации и обобщении имеющихся научных данных о применении физических методов лечения при боевой травме, что вносит вклад в развитие теории медицинской реабилитации военнослужащих. Практическая значимость определяется возможностью использования полученных автором результатов при разработке специализированных реабилитационных программ для участников СВО на базе санаторно-курортных учреждений Сочи, а также при подготовке специалистов по физической и реабилитационной медицине.

Материалы и методы исследования

Настоящее исследование выполнено в рамках теоретического анализа и носит обзорно-аналитический характер. Материалами для исследования послужили:

- научные статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных журналах, индексируемых в РИНЦ и ВАК (базы данных e-LIBRARY.RU, КиберЛенинка);

- национальные клинические рекомендации и методические документы Министерства здравоохранения и Министерства обороны Российской Федерации;
- официальные данные о санаторно-курортных учреждениях Сочи, осуществляющих реабилитацию военнослужащих.

При написании статьи, автором применялись следующие методы научного познания: теоретический анализ и синтез научной литературы, системный анализ, сравнительный анализ, классификация и типологизация, обобщение и систематизация.

Методологической основой исследования стал биопсихосоциальный подход к реабилитации, закреплённый в Международной классификации функционирования (МКФ), а также принципы доказательной медицины.

Согласно современным представлениям, реабилитация лиц с боевой травмой должна строиться на принципах раннего начала, непрерывности, преемственности между этапами, мультидисциплинарности и индивидуализации программ. [2]

Результаты и обсуждение

Структура боевых повреждений и реабилитационные потребности участников СВО. Прежде чем говорить о конкретных методах восстановительного лечения, необходимо чётко понимать, с какими именно повреждениями сталкивается реабилитолог. Современная боевая травма в ходе СВО характеризуется: [3]

- высокой долей минно-взрывных ранений (по различным оценкам, до 70–80% от общего числа боевых потерь),
- сочетанным характером повреждений,
- значительной частотой черепно-мозговых травм (в том числе лёгкой степени, нередко остающихся недиагностированными на ранних этапах эвакуации),
- ампутаций конечностей,
- повреждений периферической нервной системы,
- психическими расстройствами, прежде всего ПТСР.

Принципиально важно, что значительная часть участников СВО нуждается не в лечении какого-либо одного повреждения, а в комплексной реабилитации с одновременным воздействием на несколько систем организма.

Таблица 1

Основные нозологические формы боевых повреждений у участников СВО и соответствующие реабилитационные задачи

Нозологическая форма	Частота встречаемости (ориентировочно)	Основные реабилитационные задачи
Минно-взрывная травма (МВТ)	70–80% от боевых санитарных потерь	Восстановление функции опорно-двигательного аппарата, нервной системы, устранение болевого синдрома
Черепно-мозговая травма (ЧМТ)	30–40% от числа раненых	Нейрореабилитация, восстановление когнитивных функций, коррекция вестибулярных нарушений
Ампутации конечностей	10–15% от числа тяжелораненых	Подготовка к протезированию, восстановление двигательных навыков, психологическая адаптация
Повреждения периферических нервов	20–25% от числа раненых	Восстановление нервно-мышечной проводимости, профилактика контрактур
ПТСР и другие психические расстройства	До 30–40% участников боевых действий	Психоэмоциональная стабилизация, нормализация сна, социальная реинтеграция
Ожоги	5–8% от числа раненых	Устранение рубцовых деформаций, восстановление подвижности суставов

Примечание: данные приводятся по материалам научных обзоров. [4]

Таким образом, уже из структуры повреждений очевидно, что физиотерапия и ЛФК востребованы при подавляющем большинстве нозологических форм боевой травмы. Вопрос лишь в том, какие именно методы, в какой последовательности и в каком сочетании следует применять.

Физиотерапевтические методы в реабилитации участников СВО. Физиотерапия как раздел медицины, использующий лечебные физические факторы, располагает широким арсеналом методов воздействия, каждый из которых имеет свои механизмы действия, показания и противопоказания. [5]

Применительно к реабилитации боевой травмы наибольшее значение приобретают следующие направления:

1. Электролечение – пожалуй, наиболее востребованный раздел физиотерапии при боевой травме.
2. Импульсная магнитотерапия на повреждённые нервные стволы оказывает противоотёчное и стимулирующее действие; низкочастотная электростимуляция применяется при денервационном процессе, а электростимуляция у постели

больного с динамическим подбором параметров позволяет начинать воздействие уже на ранних этапах реабилитации. [6]

3. Транскраниальная магнитная стимуляция занимает особое место в нейрореабилитации участников СВО с ЧМТ и ПТСР, поскольку способна модулировать возбудимость коры головного мозга, нормализовывать нейродинамические процессы и оказывать анксиолитическое действие. [7]
4. Ультразвуковая терапия и ультрафонофорез лекарственных препаратов широко применяются при рубцовых деформациях после ожогов, при контрактурах суставов, при повреждениях сухожильно-связочного аппарата. Механическое действие ультразвука малой интенсивности, используемой в физиотерапии, заключается в вибрационном микромассаже тканей, при этом в клетках и тканевых структурах усиливаются процессы диффузии и осмоса; [8]
5. Лазеротерапия и магнитолазерная терапия обладают выраженным противовоспалительным, анальгетическим и биостимулирующим действием, что делает их незаменимыми при лечении длительно незаживающих ран, трофических нарушений, болевых синдромов различного генеза.
6. Рефлексотерапия (акупунктура, электроакупунктура) широко используется в медицинской реабилитации военнослужащих с различными нозологиями, в том числе для повышения адаптационных возможностей и профилактики реакций патологического стресса. [9]

Таблица 2

Основные физиотерапевтические методы в реабилитации участников СВО

Метод	Механизм действия	Показания при боевой травме	Этап реабилитации
Импульсная магнитотерапия	Противоотёчное, нейростимулирующее	Повреждения нервных стволов, ЧМТ, отёки	I-II
Электростимуляция	Восстановление нервно-мышечной проводимости	Денервационные атрофии, парезы, параличи	I-III
Транскраниальная магнитная стимуляция	Нейромодуляция	ЧМТ, ПТСР, когнитивные нарушения	II-III
Ультразвуковая терапия	Микромассаж тканей, противовоспалительное	Рубцы, контрактуры, артропатии	II-III
Лазеротерапия	Биостимуляция, анальгезия	Раны, трофические нарушения, болевые синдромы	I-III
Рефлексотерапия	Нейрогуморальная регуляция	ПТСР, болевые синдромы, нарушения сна	II-III

Метод	Механизм действия	Показания при боевой травме	Этап реабилитации
Бальнеотерапия	Термическое, химическое, механическое	Заболевания ОДА, нервной системы, сосудов	II–III
Климатотерапия	Адаптогенное, иммуностимулирующее	Общая реабилитация, психоэмоциональное восстановление	III

Примечание: I – ранний восстановительный этап (стационар); II – поздний восстановительный этап (реабилитационный центр); III – санаторно-курортный этап.

Средства ЛФК в реабилитации участников СВО. Лечебная физическая культура – «метод лечения, использующий средства физической культуры с лечебно-профилактической целью для восстановления здоровья и трудоспособности больного, предупреждения осложнений и последствий патологического процесса».

В контексте реабилитации боевой травмы ЛФК выполняет несколько принципиально важных функций, которые сложно реализовать иными средствами:

- восстановление двигательного стереотипа и нейромышечного контроля, утраченных вследствие травмы или длительной иммобилизации;
- профилактика гиподинамических осложнений – тромбозов, контрактур, мышечных атрофий;
- психологический эффект двигательной активности, который при работе с участниками СВО, страдающими ПТСР и депрессивными расстройствами, нередко оказывается не менее значимым, чем собственно физиологический.

Среди средств ЛФК, применяемых при реабилитации участников СВО, следует выделить несколько ключевых направлений:

1. Лечебная гимнастика – основа ЛФК на всех этапах реабилитации – включает пассивные и активные упражнения, упражнения с сопротивлением, дыхательные упражнения; [10]
2. Механокинезотерапия с использованием роботизированных технологий – экзоскелетов, аппаратов с биологической обратной связью – позволяет значительно ускорить восстановление двигательных функций у пациентов с парезами и параличами;
3. Терренкур – дозированная ходьба по маршрутам с различным рельефом – является одним из традиционных и высокоэффективных методов санаторно-курортного лечения, особенно актуальным в условиях Сочи с его разнообразным ландшафтом;

4. Лечебное плавание и гидрокинезотерапия в бассейне обеспечивают разгрузку опорно-двигательного аппарата, снижение болевых ощущений при движениях, улучшение кровообращения и психоэмоционального состояния;
5. Адаптивный спорт рассматривается сегодня как высокоэффективное средство восстановления физического и психологического состояния, а также социальной реинтеграции участников СВО.

Природно-климатические ресурсы и инфраструктурный потенциал Сочи. Город Сочи обладает, пожалуй, наиболее богатым сочетанием природных лечебных факторов среди курортов России, что создаёт уникальные предпосылки для реабилитации участников СВО.

Климат Сочи – влажный субтропический, с мягкой зимой (средняя температура января +7°C) и тёплым летом (средняя температура июля +24°C) – оказывает выраженное адаптогенное, иммуностимулирующее и психоэмоциональное воздействие.

Аэротерапия и гелиотерапия в условиях черноморского побережья активируют нейроэндокринные механизмы регуляции, нормализуют циркадные ритмы, нарушенные у многих участников боевых действий вследствие хронического стресса и нарушений сна.

Талассотерапия – лечение морскими факторами – включает морские купания, ингаляцию морского воздуха, насыщенного аэрозолями морской соли, йода и брома, что оказывает противовоспалительное, антисептическое и общеукрепляющее действие.

Мацестинские сероводородные ванны – визитная карточка курорта Сочи – занимают особое место в арсенале бальнеотерапевтических методов.

Сероводород, проникая через кожу и дыхательные пути, оказывает мощное сосудорасширяющее, противовоспалительное, десенсибилизирующее и трофическое действие.

Применительно к реабилитации участников СВО мацестинские ванны показаны при заболеваниях и травмах опорно-двигательного аппарата, периферической нервной системы, сосудистых нарушениях.

Йодобромные воды Кудепстинского источника, используемые в санаторно-курортном комплексе «Сочинский» Министерства обороны РФ, оказывают успокаивающее действие на центральную нервную систему, нормализуют функцию щитовидной железы, улучшают обменные процессы.

Санаторно-курортная инфраструктура Сочи для реабилитации военнослужащих представлена прежде всего учреждениями Министерства обороны РФ.

Санаторно-курортный комплекс «Сочинский» МО РФ включает несколько филиалов: собственно санаторий «Сочинский» (бывший СЦВС МО РФ им. Ворошилова) и санаторий «Чемитоквадже».

В этих учреждениях ежегодно проходят медицинскую и медико-психологическую реабилитацию тысячи военнослужащих. Перечень применяемых методов лечения в данных учреждениях весьма обширен и включает климатотерапию, бальнеотерапию, аппаратную физиотерапию, лечебный массаж, ингаляции, грязелечение с применением грязи озера Тамбукан, ЛФК, терренкур, лечебное плавание в бассейне, фитотерапию, светолечение, водолечение, рефлексотерапию, аэрозольтерапию, детензотерапию, ароматерапию, озонотерапию, психотерапию, нормоксическую баротерапию, резонансно-акустическую терапию. [11]

Таблица 3.

Природные лечебные факторы Сочи и их реабилитационный потенциал для участников СВО

Природный фактор	Основные эффекты	Применение при боевой травме
Субтропический климат	Адаптогенный, иммуностимулирующий, психоэмоциональный	Общее восстановление, коррекция нарушений сна, ПТСР
Морской воздух (аэрозоли йода, брома)	Антисептический, противовоспалительный, седативный	ПТСР, заболевания дыхательных путей, иммунодефицит
Морские купания (талассотерапия)	Закаливающий, тонизирующий, гидромассажный	Общая реабилитация, заболевания ОДА, психоэмоциональные нарушения
Мацестинские сероводородные воды	Сосудорасширяющий, противовоспалительный, трофический	Травмы ОДА, периферической нервной системы, сосудистые нарушения
Йодобромные воды Кудепсты	Седативный, нейротропный, метаболический	ПТСР, нарушения сна, заболевания нервной системы
Горный рельеф (терренкур)	Кардиотренирующий, тонизирующий	Восстановление физической работоспособности, заболевания ССС

Источник: по материалам автора

Принципы построения мультидисциплинарных реабилитационных программ. Современный подход к реабилитации участников СВО предполагает обязательную мультидисциплинарность реабилитационной команды.

В состав такой команды должны входить врач по физической и реабилитационной медицине, травматолог-ортопед, клинический психолог,

эрготерапевт, медицинская сестра, протезист, а при необходимости – другие специалисты.

В условиях санаторно-курортных учреждений Сочи к этому составу закономерно добавляются врач-физиотерапевт, инструктор ЛФК, специалист по бальнеотерапии, климатотерапевт.

Реабилитационная программа для участника СВО в условиях Сочи должна строиться с учётом нескольких принципиально важных положений.

Прежде всего, необходима детальная оценка функционального статуса пациента по МКФ с формулировкой реабилитационного диагноза и определением реалистичных целей восстановления. Далее, физиотерапевтические методы и средства ЛФК должны назначаться в строгом соответствии с этапом реабилитации, ведущим синдромом и индивидуальными противопоказаниями.

Важнейший принцип – постепенность наращивания нагрузок, особенно у пациентов с ЧМТ и сердечно-сосудистыми нарушениями. Наконец, природные климатические факторы Сочи следует рассматривать не как дополнение, а как полноправный компонент реабилитационной программы, тщательно дозированный и адаптированный к состоянию конкретного пациента.

Отдельного внимания заслуживает вопрос реабилитации участников СВО с ПТСР средствами физической культуры и физиотерапии. Имеющиеся данные убедительно свидетельствуют о том, что регулярная дозированная физическая нагрузка оказывает выраженное анксиолитическое и антидепрессивное действие, нормализует уровень кортизола и других стрессовых гормонов, улучшает качество сна. [12]

Применение транскраниальной магнитной стимуляции при ПТСР позволяет снизить выраженность флэшбэков, тревоги и гипервозбудимости. Бальнеотерапия с использованием йодобромных и сероводородных ванн оказывает выраженное седативное и нейротропное действие, что особенно ценно в комплексном лечении этого расстройства.

Выводы

Проведённый теоретический анализ позволяет сформулировать ряд принципиальных выводов.

Физиотерапия и лечебная физическая культура являются необходимыми, а не факультативными компонентами реабилитации участников СВО при подавляющем большинстве нозологических форм боевой травмы – от повреждений опорно-двигательного аппарата и периферической нервной системы до черепно-мозговой травмы и ПТСР.

Город Сочи располагает уникальным сочетанием природных лечебных факторов (мацестинские сероводородные воды, йодобромные воды Кудепсты, субтропический климат, морская среда) и развитой санаторно-курортной инфраструктурой Министерства обороны РФ, что делает его одной из наиболее перспективных баз для реализации третьего (санаторно-курортного) этапа реабилитации участников СВО.

Эффективность реабилитации в условиях сочинских здравниц может быть существенно повышена при условии соблюдения принципов мультидисциплинарности, индивидуализации программ, поэтапности и преемственности между стационарным, реабилитационным и санаторно-курортным этапами. Перспективным направлением является интеграция в реабилитационные программы высокотехнологичных физиотерапевтических методов – транскраниальной магнитной стимуляции, роботизированной механокинезотерапии, биологической обратной связи – с традиционными природными лечебными факторами курорта.

Необходимо дальнейшее развитие научно-методической базы реабилитации участников СВО на курорте Сочи, включая проведение клинических исследований эффективности конкретных реабилитационных программ и подготовку специализированных кадров.

References

1. Колесникова, О. А. Комплексный подход к реабилитации участников специальной военной операции, получивших инвалидность / О. А. Колесникова // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2023. – № 2(45). – С. 99-105.
2. Современные аспекты медицинской реабилитации лиц с боевой травмой (аналитический обзор литературы) / И. В. Погонченкова, А. М. Щикота, А. Г. Кашежев [и др.] // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 115-127.
3. Клинико-психологические особенности сочетанной травмы участников военных действий / Л. С. Васильева, Н. В. Сливницына, О. И. Шевченко [и др.] // Политравма. – 2024. – № 2. – С. 55-61.
4. Скобелина, Н. А. Ключевые составляющие реабилитации участников специальной военной операции. (Обзор литературы) / Н. А. Скобелина // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – 2025. – Т. 102, № 4. – С. 28-35.
5. Семелева, Е. В. Медико-социальные аспекты повреждений зубочелюстной системы у участников СВО: вопросы реабилитации и адаптации / Е. В. Семелева, Е. В. Елисейкина, Е. В. Плигина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2026. – № 1(163). – С.

6. Байгиреев, А. У. Современные мультидисциплинарные подходы к реабилитации и социальной адаптации защитников Отечества: обзор эффективных практик / А. У. Байгиреев, Д. В. Голякова, М. Б. Ахильгова // Парадигма. – 2025. – № 10-1. – С. 89-94.

7. Васильева, М. Ф. Алгоритм физиотерапии раннего посттравматического периода при тяжёлой черепно-мозговой травме и сочетанной травме у детей / М. Ф. Васильева, Е. Р. Соловьева, Д. А. Иванова // Детская хирургия. – 2022. – Т. 26, № S1. – С. 26.

8. Сабанов, З. М. Современные подходы комплексной реабилитации инвалидов - участников СВО / З. М. Сабанов, Л. А. Слонова // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2025. – № 12. – С. 125-129.

9. Андреева, А. А. О необходимости введения обязательной психологической реабилитации участников СВО / А. А. Андреева // Социология и право. – 2025. – Т. 17, № 4. – С. 600-607.

10. Левин, С. В. Семейный формат занятий физическими упражнениями участников СВО и их семей как средство реабилитации и адаптации к мирной жизни / С. В. Левин, Ю. В. Смирнова // XXVIII Царскосельские чтения : Материалы международной научной конференции. В 2-х томах, Санкт-Петербург, 23–24 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, 2024. – С. 269-273.

11. Санаторно-курортный комплекс «Сочинский» Министерства обороны Российской Федерации: официальный сайт. – URL: <https://sc.mil.ru> (дата обращения: 10.05.2026).

12. Клинические рекомендации. Посттравматическое стрессовое расстройство. – М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2023. – 96 с. – URL: https://spbimi.ru/wp-content/uploads/2023/06/1267_kr23f43p1mz.pdf (дата обращения: 10.05.2026).

UDC 616-056.5-084

Sin'kova G.M., Shadarova A.V., Gurzhapova R.A., Sodboeva V.N.
**A comprehensive approach to primary prevention
of overweight and obesity based on data on risk factors among
the adult population affiliated with the polyclinic
of Irkutsk City Clinical Hospital No. 1 in 2025**

Sin'kova Galina Mikhailovna,

Head of the Department of Polyclinic Therapy and General Medical Practice, Irkutsk State Medical University, Irkutsk.

Shadarova Ayuna Viktorovna,

6th year student of the Faculty of Medicine, Irkutsk State Medical University, Irkutsk.

Gurzhapova Regina Alexandrovna,

6th year student of the Faculty of Medicine, Irkutsk State Medical University, Irkutsk.

Sodboeva Victoria Nikolaevna,

6th year student of the Faculty of Medicine, Irkutsk State Medical University, Irkutsk.

Scientific adviser: **Haptanova V.A.,**

Associate Professor, PhD

***Abstract.** The article discusses the problem of overweight and obesity among the adult population attached to the polyclinic of the Irkutsk City Clinical Hospital No. 1. The relevance is due to the high prevalence of obesity in the Russian Federation (24.6%) and the Irkutsk Region (62.5% of adults have overweight). The essence of the study was to analyze risk factors (poor nutrition, low physical activity, stress) in the adult population of the polyclinic in 2025 and to develop a comprehensive approach to primary prevention based on this analysis. Main results: the proportion of overweight individuals was 15%, obesity was detected in 5.3%; poor nutrition was identified as the leading risk factor, and low physical activity as the second. The authors proposed and substantiated a comprehensive approach that includes screening, individual and group counseling, medical and social support, interdisciplinary collaboration, and monitoring. The implementation of such an approach will systematically address the causes of obesity, increase the effectiveness of early detection, and reduce the prevalence of chronic diseases among the attached population.*

***Keywords:** overweight, obesity, risk factors, primary prevention, comprehensive approach, polyclinic, unhealthy diet, low physical activity, stress, body mass index, screening, health school.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент.
Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский
проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

1. Introduction

According to Rosstat data, an analysis of obesity incidence in the Russian Federation revealed a pronounced upward trend between 2020 and 2024. In Russia in 2024, the adult obesity rate reached 24.6%, while more than 60% of adults are overweight. In the Irkutsk Region, the proportion of adults with overweight reached 62.5% in 2024. The total number of registered obesity cases increased from 1,909.7 thousand in 2020 to 3,003.2 thousand in 2024, i.e., an increase of more than 57%, indicating a significant deterioration of the

epidemiological situation. A similar trend is observed in relative indicators: the incidence rate per 100,000 population rose from 1292.9 in 2020 to 2055.1 in 2024 (growth >50%). These data testify to the growing medical and social significance of obesity among the adult population of the Russian Federation and justify the need to develop and implement effective comprehensive measures for primary prevention, taking into account the identified trends.

This paper presents statistical data on risk factors for obesity among the population attached to the polyclinic of Irkutsk City Clinical Hospital No. 1 for the year 2025.

2. Materials and Methods

The object of the study was the adult population attached to the polyclinic of Irkutsk City Clinical Hospital No. 1. The subject of the study was the risk factors for obesity and the possibilities of their correction within the framework of a comprehensive approach to the primary prevention of overweight and obesity.

Research methods:

- Analytical method — review and analysis of scientific literature on the problem of primary prevention of obesity and risk factors among adults.

- Epidemiological method — study of the prevalence of obesity risk factors among the attached population.

- Statistical methods — processing of the obtained data using descriptive and analytical statistics.

- Method of medical and social assessment — identification of the influence of social and behavioral factors on the development of obesity.

- Modeling method — development and evaluation of the effectiveness of a comprehensive approach to primary prevention of obesity.

To analyze risk factors, a study group of 500 people (250 men and 250 women) was formed. The following main risk factors were considered: unhealthy diet, low physical activity, high stress level. Body mass index (BMI) and waist circumference were measured during routine medical examinations.

3. Results and Discussion

3.1. Prevalence of overweight and obesity

The total attached population was 78,000 people. Of these, 8,005 had overweight, and 4,123 had obesity. The proportion of the population with increased body weight (BMI \geq 25 kg/m²) was 15%. Among these, 10.1% were women and 4.9% were men; in the study group itself, the gender ratio was 65% women and 35% men. Table 1 shows the distribution by sex and age.

Table 1

Distribution of persons with overweight and obesity by sex and age.

Name	Total adult population			Including					
	Total	В том числе		Men			Women		
		Working age	Older than working age	Total	Working age	Older than working age	Total	Working age	Older than working age
Overweight	8005	4083	3922	2983	1961	1022	5022	2122	2900
Obesity	4123	1907	2216	1261	791	470	2862	1116	1746

3.2. Risk factors

The prevalence of risk factors among the surveyed 500 people is presented in Table 2.

Table 2

Prevalence of risk factors among the surveyed (n=500)

Risk factors	Men	Women
Unhealthy diet	210	205
Low physical activity	170	175
High stress level	25	15

Unhealthy diet occupies the leading place among risk factors, which is confirmed by the highest number of detected cases in both men and women. This factor directly affects the body's energy balance and contributes to excessive weight gain. Low physical activity is the second most significant factor and is also widespread. Lack of motor activity reduces energy expenditure and enhances the negative impact of unhealthy diet, creating favorable conditions for the development of obesity. High stress level is less common, but its importance should not be underestimated. Stress can act as a trigger, affecting eating behavior (overeating, choosing high-calorie foods) and reducing motivation for physical activity. Thus, the greatest contribution to the development of obesity is made by behavioral factors — unhealthy diet and physical inactivity, while stress plays an additional but significant role.

3.3. Comprehensive approach to prevention

Based on the obtained data, a comprehensive approach to primary prevention of overweight and obesity at the outpatient level has been developed. It includes the following components:

- Screening and early detection: regular measurement of BMI and waist circumference;

formation of risk groups (low physical activity, unhealthy diet, high stress); maintenance of a register of patients with risk factors.

- Individual preventive work: counseling on the principles of rational nutrition; recommendations for increasing physical activity; correction of behavioral factors (overeating, physical inactivity, stress); motivational counseling and goal setting.

- Group preventive programs ("health schools" for overweight patients): educational lectures and trainings on nutrition and lifestyle; weight loss programs under the supervision of specialists.

- Medical and social measures: consideration of social factors (income level, education, working conditions); involvement of the family in the preventive process; interaction with employers (workplace health programs).

- Organizational measures in the polyclinic: implementation of standards for preventive counseling; training of medical personnel; interdisciplinary approach (therapist, dietitian, psychologist, exercise therapy instructor).

- Information and educational work: distribution of brochures and recommendations; use of digital services (mobile applications, online consultations); formation of motivation for a healthy lifestyle.

- Monitoring and evaluation of effectiveness: follow-up observation of patients; assessment of changes in BMI and risk factors; adjustment of prevention programs based on the data obtained.

Such a systematic approach ensures a comprehensive impact on the main causes of obesity and increases the effectiveness of its primary prevention at the outpatient level.

4. Conclusions

The study showed that the activities of the polyclinic in identifying and preventing obesity are effective and meet modern healthcare requirements. A high detection rate of overweight and obesity is achieved through regular preventive examinations, active screening, and standardized patient assessment methods. The comprehensive approach, including not only diagnostics but also systematic prevention (health education, counseling on rational nutrition, physical activity, healthy lifestyle), together with interdisciplinary interaction and individualization of recommendations, is of particular importance. The analysis of risk factors has identified key directions for intervention: lifestyle modification, diet, physical activity, and stress management. Implementing the proposed comprehensive approach will reduce the risk of chronic noncommunicable diseases and improve the quality of life of the population.

References

1. Federal State Statistics Service (Rosstat). Healthcare in Russia. 2024: statistical collection. Moscow: Rosstat, 2025. 180 p.
2. Dedov I.I., Melnichenko G.A., Butrova S.A. et al. Obesity in the practice of a primary care physician: clinical recommendations. Moscow: GEOTAR-Media, 2023. 256 p.
3. Ministry of Health of the Irkutsk Region. Report on the Health Status of the Population of the Irkutsk Region for 2024. Irkutsk, 2025. 95 p.
4. Karamnova N.S., Drapkina O.M. Risk Factors for Obesity Development and Their Correction at the Outpatient Stage. Preventive Medicine. 2024;27(3):45-52.
5. World Health Organization. Obesity and Overweight: Fact Sheet. Geneva: WHO, 2024. Available at: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (accessed 10.03.2026).
6. GOST 7.32–2017. Research Report. Structure and Rules of Presentation. Moscow: Standartinform, 2017. 27 p.

UDC 611.13:616.13-053.9

Yalkapov. M.T., Smirnova G.V., Emelin G.M. Age-related features of arterial wall structure: histological changes at different stages of human life

Возрастные особенности строения стенки артерий: гистологические изменения на разных этапах жизни человека

Yalkapov. M.T., Smirnova G.V., Emelin G.M.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Mordovian State University named after. N. P. Ogareva", Saransk, Russia.

Ялкапов. М.Т., Смирнова Г.В., Емелин Г.М.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», г. Саранск, Россия.

Abstract. *With age, the vascular wall undergoes a series of regular restructurings affecting all its layers – the intima, media, and adventitia. This paper summarizes the literature data from the last five years concerning histological changes in arteries of different types (elastic, muscular, and mixed) during human ontogenesis. It is shown that the final formation of the histostructure is completed by the age of 25–30 years, after which gradual remodeling begins. Between the ages of 30 and 50, the first signs of intimal thickening appear, caused by the migration and proliferation of smooth muscle cells, as well as the initial manifestations of elastic membrane fragmentation. After the age of 50–60, these processes accelerate: elastin degradation in the media increases with a parallel increase in collagen content and the formation of its covalent cross-links, calcification develops, the number of smooth muscle cells decreases, and the remaining cells acquire a synthetic and osteogenic phenotype. The most pronounced age-related changes are characteristic of elastic arteries (aorta, common carotid arteries), while muscular arteries undergo lesser changes. Histological changes underlie increased vascular wall stiffness, which is clinically manifested by increased pulse wave velocity, increased systolic blood pressure, and the development of isolated systolic hypertension in the elderly.*

Keywords: *arterial aging, vascular wall histology, elastic fibers, elastin degradation, intima, media, smooth muscle cells, calcification, arterial stiffness.*

Аннотация. *С возрастом сосудистая стенка претерпевает ряд закономерных перестроек, затрагивающих все её оболочки – интиму, медию и адвентицию. В работе обобщены литературные данные последних пяти лет, касающиеся гистологических изменений артерий разного типа (эластического, мышечного и смешанного) в онтогенезе человека. Показано, что окончательное формирование гистоструктуры завершается к 25–30 годам, после чего начинается постепенное ремоделирование. В интервале 30–50 лет появляются первые признаки утолщения интимы, обусловленного миграцией и пролиферацией гладкомышечных клеток, а также начальные проявления фрагментации эластических мембран. После 50–60 лет эти процессы ускоряются: в медию нарастает дегградация эластина с параллельным увеличением количества коллагена и формированием его ковалентных сшивок, развивается кальцификация, снижается численность гладкомышечных клеток, а оставшиеся клетки приобретают синтетический и остеогенный фенотип. Наиболее выраженные возрастные изменения характерны для артерий эластического типа (аорта, общие сонные артерии), тогда как мышечные артерии изменяются в меньшей степени. Гистологическая перестройка лежит в основе повышения жёсткости сосудистой стенки, что клинически проявляется увеличением скорости распространения пульсовой волны, ростом систолического артериального давления и формированием изолированной систолической гипертензии у пожилых людей.*

Ключевые слова: *старение артерий, гистология сосудистой стенки, эластические волокна, дегградация эластина, интима, медию, гладкомышечные клетки, кальцификация, артериальная жёсткость.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент.
Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

1. Введение

Человеческий организм стареет гетерохронно [5]. Одни ткани и системы долго сохраняют свои функциональные свойства, другие начинают «ломаться» уже в сравнительно молодом возрасте. Сердечно-сосудистая система — одна из тех, чьё состояние напрямую определяет продолжительность жизни. По данным ВОЗ, болезни сердца и сосудов прочно удерживают первое место среди всех причин смерти в мире, и львиная доля этих смертей приходится на возрастных людей. Риск инфаркта, инсульта и гипертонии с годами растёт многократно, и в основе этого роста лежат те изменения, которые десятилетиями накапливаются в стенке кровеносных сосудов.

Многие врачи и даже некоторые исследователи склонны рассматривать возрастные изменения сосудов как нечто неизбежное, пассивное, похожее на износ механизма. Но это не совсем так. Старение сосудистой стенки — это активный, программируемый процесс, в котором участвуют окислительный стресс, воспаление, клеточное старение и ферментативная деструкция внеклеточного матрикса. Другое дело, что запускается этот процесс под влиянием тех же факторов, которые действуют на все остальные ткани [17].

Артериальная стенка характеризуется сложной трёхслойной организацией [1]. Внутренняя (интима) контактирует с кровью и через эндотелий регулирует проницаемость, тонус и свёртываемость. Средняя (медия) — это каркас, придающий сосуду и эластичность, и прочность. Наружная (адвентиция) содержит сосуды сосудов и нервы.

В молодости все эти компоненты работают слаженно. Но с годами баланс между синтезом и распадом внеклеточного матрикса нарушается. Эластические волокна, которые позволяют аорте растягиваться в систолу, постепенно разрушаются [10]. На их месте накапливается коллаген — более жёсткий белок. Клетки теряют свою специфическую функцию, а часть из них вообще гибнет. В итоге сосуд становится ригидным, похожим на старую резиновую трубку, которая уже не может ни хорошо растянуться, ни нормально сжаться.

В работе (показаны общие закономерности изменения гистологического строения стенки артерий в зависимости от возраста, рассмотрено, как именно меняется гистологическое строение артерий на разных этапах жизни человека — от рождения до глубокой старости. При этом основное внимание уделено не атеросклерозу (хотя он часто сопутствует), а собственно возрастным, инволютивным изменениям [14]. Такой подход позволяет отделить неизбежное от патологического и лучше понять, почему у пожилого человека повышается давление и растёт риск сосудистых катастроф.

2. Основная часть

2.1. Нормальная гистологическая структура артериальной стенки

Прежде чем говорить об изменениях, необходимо чётко представить себе норму. Без этого трудно понять, что именно и когда отклоняется от исходного состояния. Стенка любой артерии, независимо от её размера и функции, имеет три оболочки [1]. Но соотношение структурных компонентов в этих оболочках, особенно в меди, сильно варьирует в зависимости от типа сосуда.

Строение внутренней оболочки, интимы. Её поверхность, контактирующая с просветом сосуда, выстлана эндотелием. Эндотелиальные клетки лежат на базальной мембране и плотно прилежат друг к другу. У молодого человека они имеют полигональную форму, их ядра уплощены. Под эндотелием находится подэндотелиальный слой — тонкая прослойка рыхлой соединительной ткани. В ней можно встретить отдельные фибробласты, редкие гладкомышечные клетки, тонкие коллагеновые и эластические волокна. Глубже располагается внутренняя эластическая мембрана — на светоптическом уровне она выглядит как блестящая, волнистая линия, пронизанная многочисленными отверстиями [6].

Средняя толстая оболочка, меди, — это самая мощная часть сосудистой стенки. Именно её строение служит основным критерием для деления артерий на типы [1]. В меди артерий эластического типа (аорта, лёгочный ствол, общие сонные) преобладают окончатые эластические мембраны. В аорте молодого человека их насчитывается примерно 45–50. Эти мембраны расположены концентрически, одна внутри другой, наподобие матрёшек. Между мембранами залегают отдельные гладкомышечные клетки, немного тонких коллагеновых и эластических волокон. Такое обилие эластики не случайно: аорта должна при систоле растягиваться, запасая энергию, а в диастолу — сжиматься, отдавая эту энергию и поддерживая кровоток.

В артериях мышечного типа (коронарные, почечные, брыжеечные, бедренные, артерии среднего и малого калибра) в меди доминируют гладкомышечные клетки. Они расположены циркулярными пучками или по пологой спирали, образуя 10–20 слоёв (в крупных мышечных артериях). Пространство между клетками заполняет аморфное вещество, в котором содержится небольшое количество коллагеновых и эластических волокон. Зато, характерной чертой строения является наличие хорошо выраженных эластических мембран: внутренней и наружной. Мышечные артерии не столько демпфируют пульсовую волну, сколько регулируют распределение крови, сужаясь или расширяясь под влиянием нервных импульсов и гуморальных факторов.

Артерии смешанного типа (подключичные, подвздошные) занимают промежуточное положение: в их медиі примерно равное количество эластических мембран и гладкомышечных клеток.

Наружная оболочка, адвентиция, построена из рыхлой волокнистой соединительной ткани [6]. В ней проходят *vasa vasorum* — сосуды сосудов, питающие наружные слои медиі. Здесь же находятся симпатические нервные волокна, регулирующие тонус.

Главное, что нужно запомнить: в более молодом возрасте все эти структуры находятся в оптимальном соотношении. Эластина достаточно, коллагена не слишком много, гладкомышечные клетки хорошо сохраняют сократительный фенотип. Но с годами это равновесие нарушается.

2.2. Формирование сосудистой стенки в детском и юношеском возрасте (0–25 лет)

У новорождённого ребёнка (в первые дни после рождения?) артерии уже функционируют, но их гистологическая картина заметно отличается от взрослой [5]. Стенка тоньше, слои выражены слабее, клетки и волокна ещё не достигли окончательной степени дифференцировки.

Если взять аорту новорождённого и посмотреть на неё под микроскопом, можно увидеть следующее. Эндотелий уже выстилает внутреннюю поверхность, но его клетки более округлые, чем в более старшем возрасте. Подэндотелиальный слой очень тонкий, практически не выражен. Внутренняя эластическая мембрана уже сформирована, но она тоньше, и её извитость не так заметна. В медиі эластические мембраны тоже тонкие, и количество их меньше — примерно 30–35 вместо 45–50 [18]. Гладкомышечные клетки имеют не вытянутую веретенообразную форму, а скорее округлую или овоидную, потому что сократительный аппарат у них развит ещё слабо. Адвентиция тонкая, сосуды сосудов только начинают развиваться.

В первые месяцы жизни всё это (строение) быстро меняется. Сосуды растут, стенка утолщается. Особенно интенсивные перестройки идут на первом году. Именно в этот период, когда ребёнок начинает вставать и ходить, в венах нижних конечностей появляются продольные мышечные пучки, которых при рождении не было. В артериях в это же время активно формируются эластические мембраны, увеличивается количество эластических волокон.

К 3–5 годам внутренняя эластическая мембрана приобретает характерную волнистую форму. Количество эластических мембран в аорте увеличивается до 40–45.

Гладкомышечные клетки становятся вытянутыми, в их цитоплазме появляется всё больше миофиламентов.

Примерно к 10–12 годам гистологическая структура артерий в основном соответствует взрослой. Однако это ещё (неокончательное формирование структуры) не конец. Процессы роста и дифференцировки полностью завершаются только к 25–30 годам [6]. Именно в этом возрасте сосудистая стенка достигает своего максимального развития. Толщина интимы минимальна, эластические мембраны целы и непрерывны, гладкомышечные клетки находятся в сократительном фенотипе, а коллаген представлен в количествах, достаточных для прочности, но не избыточным для жёсткости.

Правда, уже в детском и юношеском возрасте в интима аорты иногда можно увидеть единичные липидные пятна — скопления пенистых клеток. Но это уже начало атеросклеротического процесса, а не чисто возрастной инволюции. Для возрастных изменений период до 25–30 лет — это время стабильности, когда деструктивных процессов практически нет.

2.3. Латентная фаза старения (30–50 лет)

После завершения формирования сосудистой стенки наступает довольно длительный период, который можно назвать латентной фазой старения. На глаз, при обычном гистологическом исследовании, никаких серьёзных изменений в артериях 30–40-летнего человека обычно не видно. Но если использовать морфометрию и электронную микроскопию, первые признаки ремоделирования уже можно обнаружить.

Самое раннее и самое постоянное изменение — это утолщение внутренней оболочки. Если в 25 лет интима аорты занимает 5–7% от общей толщины стенки, то к 50 годам этот показатель вырастает до 10–15% [18]. За счёт чего происходит утолщение? Часть гладкомышечных клеток из медики начинает мигрировать в интиму, проходя через отверстия внутренней эластической мембраны. Попав туда, они меняют свой фенотип: перестают быть сократительными и превращаются в синтетические. Теперь их основная задача — не сокращение, а производство внеклеточного матрикса. Они начинают активно синтезировать коллаген, эластин и, что особенно важно, протеогликаны. Последние обладают способностью связывать липопротеины низкой плотности, поэтому в утолщённой интима постепенно создаются условия для задержки липидов.

В молодом возрасте этот процесс носит адаптивный характер. Сосуд как бы «укрепляет» свою внутреннюю оболочку, реагируя на механические нагрузки. Но со временем адаптивный механизм начинает работать во вред.

Внутренняя эластическая мембрана в возрасте 30–50 лет пока ещё сохраняет свою целостность. При световой микроскопии она выглядит нормальной — тонкой, непрерывной, равномерно окрашенной. Однако при электронно-микроскопическом изучении можно заметить отдельные участки истончения и незначительного расщепления. Это самые ранние признаки деградации эластина.

В меди в этом возрасте явных изменений обычно не находят. Эластические мембраны выглядят интактными. Гладкомышечные клетки сохраняют сократительный фенотип. Коллагеновых волокон между мембранами примерно столько же, сколько и было.

В артериях мышечного типа картина в этом возрасте практически не отличается от молодой. Интима тонкая, внутренняя эластическая мембрана чёткая, медиа плотная. Иногда в области бифуркаций можно видеть локальное утолщение интимы, но это, скорее, гемодинамический ответ, а не возрастное изменение.

Таким образом, период 30–50 лет — это время, когда изменения уже начались, но они ещё минимальны, компенсированы и никак не проявляются ни на функциональном, ни на клиническом уровне [20].

Именно в этом возрастном интервале происходят наиболее драматичные гистологические изменения. То, что в 40 лет только начиналось, в 60–70 становится очевидным. И если до 50 лет сосуд ещё можно считать практически здоровым, то после 50 процессы деградации начинают явно преобладать над процессами восстановления.

2.4. Прогрессирующее ремоделирование (50–70 лет)

К 60–70 годам интима аорты утолщается в 2–3 раза по сравнению с 30-летним возрастом [18]. На некоторых участках её толщина приближается к толщине меди, а иногда и превышает её. Что мы видим в этой утолщённой интиме под микроскопом?

Во-первых, там много гладкомышечных клеток. Но это не обычные сократительные клетки, а их синтетический вариант. Они округлые или полигональные, с хорошо развитым гранулярным эндоплазматическим ретикуломом и аппаратом Гольджи. Между ними и вокруг них — обилие коллагеновых волокон. В некоторых местах коллаген расположен рыхло, в других — плотными пучками.

Во-вторых, в интиме откладывается много протеогликанов, в первую очередь версикана [7]. Версикан — это крупный протеогликан, который связывает много воды и создаёт студенистую среду. Он же является «ловушкой» для липопротеинов низкой плотности. Поэтому в утолщённой интиме пожилых людей нередко можно увидеть липидные включения — ещё не бляшку, но уже предпосылку для неё.

Эндотелий в этом возрасте истончается. Эндотелиальные клетки становятся более плоскими, теряют микроворсинки, количество рецепторов на их поверхности уменьшается. Многие из них вступают в состояние сенесценции — перестают делиться, но продолжают жить и выделять провоспалительные цитокины. Такой сенесцентный эндотелий хуже вырабатывает оксид азота и, наоборот, активнее производит молекулы адгезии, способствующие прикреплению лейкоцитов.

Внутренняя эластическая мембрана претерпевает характерные изменения. В норме это непрерывная пластинка. В пожилом возрасте на ней появляются разрывы, расщепления, участки истончения и, напротив, утолщения. При окраске на эластику она выглядит фрагментированной, с неровными краями. Через эти дефекты гладкомышечные клетки из медики активно мигрируют в интиму.

В медики происходят самые значимые изменения — именно они определяют функциональное состояние сосуда.

Возьмём аорту. Количество окончательных эластических мембран заметно уменьшается. Если у 30-летнего человека их 45–50, то у 60–70-летнего — 30–35, а иногда и меньше. Но главное — не только количество, но и качество. Сохранившиеся мембраны становятся тоньше, их края неровные, появляются участки разволокнения. При электронной микроскопии видно, что эластические волокна теряют свою упорядоченную структуру, в них появляются трещины, изъяны.

Между мембранами возникают зоны полного отсутствия эластина — так называемые очаги эластолиза. В этих участках весь груз ложится на коллаген. А коллагена становится всё больше. Коллагеновые волокна накапливаются в межмембранных пространствах, идут хаотично, переплетаются друг с другом. Но дело не только в количестве. С возрастом в коллагене нарастает количество ковалентных поперечных сшивок. Они образуются в результате реакций неферментативного гликирования, когда к молекулам коллагена присоединяются сахара. Образуются так называемые конечные продукты гликирования (AGE). Чем старше человек, тем больше AGE накапливается в коллагене. А чем больше сшивок, тем коллаген жёстче и устойчивее к ферментативному распаду.

Гладкомышечные клетки в медики пожилого человека становятся редкостью. Часть из них гибнет — через апоптоз или некроз. Другая часть меняет фенотип. Вместо того чтобы быть сократительными, они превращаются в синтетические и даже в остеогенные. В цитоплазме таких клеток уменьшается количество миофиламентов и увеличивается количество гранулярного эндоплазматического ретикулума. Они начинают вырабатывать не только коллаген, но и щелочную фосфатазу, Runx2, BMP-2 — то есть белки, характерные для костной ткани.

Именно с остеогенной трансформацией гладкомышечных клеток связана кальцификация меди, которую называют артериосклерозом Мёнкеберга. На гистологических срезах, окрашенных гематоксилином-эозином, кальцинаты выглядят как базофильные (тёмно-синие) зернистые массы, лежащие по ходу эластических волокон. При специальных окрасках (по фон Косса) они становятся чёрными. Кальцификация начинается в 50–60 лет и с каждым десятилетием охватывает всё больше людей. После 70 лет кальцинаты в аорте обнаруживаются более чем у половины, а после 80 — практически у всех [18].

Важно подчеркнуть: кальцификация меди — это не то же самое, что кальцификация атеросклеротической бляшки. В первом случае кальций откладывается в средней оболочке, вдоль эластических волокон. Во втором — в интимае, в толще бляшки. Это разные процессы, хотя они часто сосуществуют.

В артериях мышечного типа возрастные изменения в целом сходны, но выражены значительно слабее [11]. Поскольку эластических волокон там изначально мало, их деградация не играет такой роли. Основные изменения касаются интимы и гладкомышечных клеток.

Интимы в мышечных артериях утолщается, но не так сильно, как в аорте. Гладкомышечные клетки в меди постепенно исчезают, а между ними накапливается коллаген. Внутренняя и наружная эластические мембраны могут становиться тоньше, местами фрагментироваться, но полного их разрушения обычно не бывает. Кальцификация меди в мышечных артериях встречается реже и носит локальный, очаговый характер.

Эти различия между типами артерий имеют большое клиническое значение. Поскольку аорта и каротиды стареют быстрее и сильнее, именно они становятся главным источником повышения жёсткости и роста систолического давления. Мышечные артерии дольше сохраняют способность к регуляции тонуса.

2.5. Изменения адвентиции

Наружная оболочка в пожилом возрасте становится более плотной, грубой. Количество коллагеновых волокон в ней увеличивается. Часть фибробластов трансформируется в миофибробласты — клетки, обладающие свойствами и фибробластов, и гладкомышечных клеток.

Сосуды сосудов (*vasa vasorum*) претерпевают перестройку. Их стенки утолщаются, просвет становится неравномерным — то сужается, то расширяется. В некоторых случаях отдельные *vasa vasorum* полностью закрываются (облитерируются).

Это ухудшает питание наружных слоёв меди, которая и без того страдает от утолщения интимы и снижения диффузии из просвета.

В адвентиции пожилых людей часто встречаются очаговые скопления лимфоцитов и макрофагов. Это проявления «воспалительного старения» — хронического вялотекущего воспаления, которое сопровождает возрастные изменения и само по себе поддерживает деструктивные процессы в сосудистой стенке [17].

2.6. Глубокая старость (после 70 лет)

После 70 лет процессы деградации достигают максимума. В аорте эластические волокна сохраняются лишь в виде отдельных фрагментов. Вместо ровных мембран под микроскопом видны лишь обрывки, разрозненные волокна. Коллаген занимает доминирующее положение, расположен беспорядочно, часто склерозирован.

Гладкомышечных клеток в меди остаётся очень мало. Те, что сохранились, находятся в сенесцентном состоянии: их ядра гиперхромные, цитоплазма бедна миофиламентами, но богата лизосомами и липидными включениями. Они уже не способны сокращаться, но продолжают выделять провоспалительные факторы и металлопротеиназы.

Кальцификация меди становится почти универсальной [12]. Кальцинаты могут быть пылевидными, рассеянными по всей меди, или крупными, в виде плотных пластин. В зонах массивной кальцификации сосудистая стенка становится хрупкой, легко травмируется.

Внутренняя эластическая мембрана либо полностью разрушена, либо сохраняется в виде отдельных фрагментов. Интимы достигает максимальной толщины — часто толще, чем меди. В утолщённой интима видны скопления пенистых клеток, липидные включения, очаги кальциноза.

В мышечных артериях меди истончается, часть гладкомышечных клеток замещается соединительной тканью [7]. Внутренняя и наружная эластические мембраны носят прерывистый характер. В интима нередко выявляются атеросклеротические бляшки.

Важно понимать: всё это — нормальное старение, а не патология. Эти изменения происходят у всех, кто доживает до 70–80 лет, хотя выраженность у разных людей может сильно различаться. Но именно они создают ту почву, на которой атеросклероз, гипертония и другие болезни развиваются гораздо легче.

Возрастных изменений от атеросклероза часто путают, а между тем они принципиально разные. Возрастные изменения (артериосклероз) — это диффузный процесс, затрагивающий равномерно все участки сосудистого русла и все три

оболочки. Атеросклероз — очаговый, он начинается с интимы, чаще в местах бифуркаций и изгибов.

При атеросклерозе в медиі разрушается эластин и накапливается коллаген, развивается кальцификация медиі. При атеросклерозе в интимиі появляются липидные пятна и полосы, затем формируется фиброзная бляшка с липидным ядром.

На практике эти два процесса идут параллельно и усиливают друг друга. В возрастной, уже утолщённой и проницаемой интимиі атеросклеротическая бляшка формируется гораздо легче. Поэтому у пожилых людей атеросклероз встречается чаще и протекает тяжелее.

Все эти микроскопические изменения имеют вполне конкретные клинические проявления. Когда эластин разрушается и замещается коллагеном, аорта теряет податливость. При сокращении левого желудочка кровь выбрасывается в жёсткую, плохо растяжимую трубу. Это приводит к резкому подъёму систолического давления. Во время диастолы, наоборот, жёсткая аорта не может активно сжаться и протолкнуть кровь дальше, поэтому диастолическое давление имеет тенденцию к снижению. Возникает изолированная систолическая гипертензия — высокое «верхнее» давление при нормальном или даже низком «нижнем» [8]. Это типичный сценарий для пожилых людей.

Жёсткость артерий измеряют по скорости распространения пульсовой волны. У молодых это 5–6 м/с. У пожилых с выраженными изменениями аорты — 10–12 м/с и выше. Каждый лишний метр в секунду увеличивает сердечно-сосудистую смертность примерно на 15% [19].

Сердце, работая против повышенной нагрузки, гипертрофируется. Левый желудочек утолщается. Сначала это компенсация, потом — патология. Развивается диастолическая дисфункция, а затем и сердечная недостаточность с сохранённой фракцией выброса — очень частая форма у пожилых.

Мозг и почки тоже страдают. Жёсткая аорта плохо гасит пульсовую волну, и её колебания передаются на мелкие сосуды. В мозге это ведёт к лакунарным инфарктам, лейкоареозу и когнитивным нарушениям. В почках — к гломерулосклерозу и снижению фильтрации [20].

3. Заключение

Возрастные изменения строения стенки артерий — это закономерный, неизбежный процесс, который начинается после 30 лет и прогрессирует до глубокой старости [11]. Ключевые гистологические события: утолщение интимы, деградация эластических волокон в медиі, накопление коллагена, потеря гладкомышечных клеток

и кальцификация. Тяжелее всего страдают артерии эластического типа (аорта и сонные), у мышечных артерий изменения выражены слабее [11].

Эти изменения ведут к повышению жёсткости сосудистой стенки, что клинически проявляется увеличением скорости пульсовой волны, ростом систолического давления и развитием гипертрофии левого желудочка. Понимание возрастной гистологии артерий необходимо не только морфологам, но и клиницистам — оно помогает прогнозировать течение возраст-ассоциированных заболеваний и разрабатывать меры профилактики [3, 17].

References

1. Афанасьев ЮИ, Юрина НА (ред.), 2023. Гистология, эмбриология, цитология: учебник. М.: ГЭОТАР-Медиа. С. 312-325.
2. Всемирная организация здравоохранения, 2023. Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ). [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)). Дата обращения: 10.09.2025.
3. Гома ТВ, Цыренова АА, 2023. «Сосудистый возраст» и его значение в клинической практике. Байкальский медицинский журнал 2(3): 56-63.
4. Литовченко ОГ, Гулагаева БН, 2025. Особенности возрастных изменений организма пожилых людей (обзор литературы). Журнал фундаментальной медицины и биологии 9(3): 45-52. doi: 10.24412/2588-0500-2025_09_03_9.
5. Пузик ВИ, Харькова АА, 2024. Возрастная морфология сердечно-сосудистой системы человека. Репринтное издание. М.: Книга по требованию. 412 с.
6. Сапин МР, 2021. Анатомия человека. В 2 томах. 5-е изд. М.: ГЭОТАР-Медиа. Т. 2. С. 245-268.
7. Chen R, McVey DG, Shen D, Huang X, Ye S, 2023. Phenotypic switching of vascular smooth muscle cells in atherosclerosis. Journal of the American Heart Association 12(20): e031121. doi: 10.1161/JAHA.123.031121
8. Franklin SS, 2006. Hypertension in the elderly. Journal of Clinical Hypertension 8(5): 363-370. doi: 10.1111/j.1524-6175.2006.05315.x.
9. Grootaert MOJ, Moulis M, Roth L, Martinet W, Vindis C, Bennett MR, De Meyer GRY, 2018. Vascular smooth muscle cell death, autophagy and senescence in atherosclerosis. Cardiovascular Research 114(4): 622-634. doi: 10.1093/cvr/cvy007.
10. Lacolley P, Regnault V, Segers P, Laurent S, 2017. Vascular smooth muscle cells and arterial stiffening: relevance in development, aging, and disease. Physiological Reviews 97(4): 1555-1617. doi: 10.1152/physrev.00003.2017.

11. Lakatta EG, Levy D, 2003. Arterial and cardiac aging: major shareholders in cardiovascular disease enterprises. Part I: aging arteries: a "set up" for vascular disease. *Circulation* 107(1): 139-146. doi: 10.1161/01.cir.0000048892.83521.58.
12. Lanzer P, Hannan FM, Lanzer JD, Janzen J, Raggi P, Furniss D, et al., 2021. Medial arterial calcification: JACC state-of-the-art review. *Journal of the American College of Cardiology* 78(11): 1145-1165. doi: 10.1016/j.jacc.2021.06.049.
13. Laurent S, Cockcroft J, Van Bortel L, Boutouyrie P, Giannattasio C, Hayoz D, et al., 2006. Expert consensus document on arterial stiffness: methodological issues and clinical applications. *European Heart Journal* 27(21): 2588-2605. doi: 10.1093/eurheartj/ehl254.
14. Libby P, 2021. The changing landscape of atherosclerosis. *Nature* 592(7855): 524-533. doi: 10.1038/s41586-021-03392-8.
15. Nilsson PM, Boutouyrie P, Laurent S, 2023. Vascular aging: a tale of EVA and SUV. *Journal of the American College of Cardiology* 82(8): 783-795. doi: 10.1016/j.jacc.2023.05.063.
16. O'Rourke MF, Hashimoto J, 2007. Mechanical factors in arterial aging: a clinical perspective. *Journal of the American College of Cardiology* 50(1): 1-13. doi: 10.1016/j.jacc.2006.12.050.
17. Ungvari Z, Tarantini S, Donato AJ, Galvan V, Csiszar A, 2018. Mechanisms of vascular aging. *Circulation Research* 123(7): 849-867. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.118.311378.
18. Virmani R, Avolio AP, Mergner WJ, Robinowitz M, Herderick EE, Cornhill JF, et al., 1991. Effect of aging on aortic morphology in populations with high and low prevalence of hypertension and atherosclerosis. *American Journal of Pathology* 139(5): 1119-1129.
19. Vlachopoulos C, Aznaouridis K, Stefanadis C, 2010. Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with arterial stiffness: a systematic review and meta-analysis. *Journal of the American College of Cardiology* 55(13): 1318-1327. doi: 10.1016/j.jacc.2009.10.061.
20. Wang M, Monticone RE, Lakatta EG, 2018. Arterial aging: a journey into subclinical arterial disease. *Current Opinion in Nephrology and Hypertension* 27(4): 252-259. doi: 10.1097/MNH.0000000000000414.

TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS

UDC 339.54.012

Gilfanova D.R., Grigoryan K.A. Development of an algorithm for ball detection and tracking in video for automated judging in rhythmic gymnastics

Разработка алгоритма детекции и отслеживания мяча на видео для задач автоматизированного судейства в художественной гимнастике

Gilfanova Diana Rafaelevna,

Master's candidate in Digital Product Analytics and Development Management at the ITIS KFU, Kazan

Grigoryan Karen Albertovich,

Candidate of Economics, Associate Professor, Kazan (Volga region) Federal University, Kazan

Гильфанова Диана Рафаэлевна,
магистрант направления "Аналитика и управление разработкой цифровых продуктов"
института ИТИС КФУ, г. Казань

Григорян Карен Альбертович,
кандидат экономических наук, доцент, Казанский Приволжский Федеральный университет,
г. Казань

Abstract. Rhythmic gymnastics is a sport that is challenging for objective judging, where the accuracy of evaluating elements, especially dynamic elements involving a ball, depends significantly on subjective factors and judges' fatigue. In this paper, an algorithm for automatic ball detection in video is proposed, based on a combination of a fine-tuned YOLOv8 detection model and the ByteTrack tracking algorithm. The model was fine-tuned on a custom dataset that accounts for domain-specific conditions, including small object size, motion blur, occlusions, and complex backgrounds. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm achieves high detection accuracy ($mAP@0.5 \approx 0.99$), as well as robustness to occlusions and stable object tracking, which makes it suitable as a foundation for developing automated evaluation systems in rhythmic gymnastics.

Keywords: rhythmic gymnastics, computer vision, object detection, object tracking, YOLOv8, ByteTrack, deep learning, sports analytics.

Аннотация. Художественная гимнастика представляет собой сложный для объективного судейства вид спорта, где точность оценки элементов, особенно динамических с использованием мяча, зависит от субъективных факторов и усталости судей. В данной статье предложен алгоритм автоматической детекции мяча на видео, основанный на комбинации дообученной модели детекции YOLOv8 и алгоритма трекинга ByteTrack. Модель дообучалась на кастомном датасете с учетом специфических условий: малого размера объекта, размытий, окклюзий и сложного фона. В результате проведенных экспериментов разработанный алгоритм продемонстрировал высокую точность детекции ($mAP@0.5 \approx 0.99$), а также устойчивость к окклюзиям и стабильность отслеживания объекта, что позволяет рассматривать его в качестве основы для построения систем автоматизированной оценки в художественной гимнастике.

Ключевые слова: художественная гимнастика, компьютерное зрение, детекция объектов, отслеживание объектов, YOLOv8, ByteTrack, глубокое обучение, спортивная аналитика.

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

ВВЕДЕНИЕ

Художественная гимнастика (ХГ) представляет собой один из наиболее зрелищных и субъективно сложных видов спорта, в котором исполнение элементов требует от спортсменок не только исключительной физической подготовки, но и предельной точности координации движений. Оценка таких элементов осуществляется вручную квалифицированными судьями в соответствии с действующими правилами Международной федерации гимнастики (FIG), однако они испытывают значительные психофизические нагрузки в течение длительных соревнований, что неизбежно приводит к усталости, снижению концентрации и, как следствие, ошибкам и пропуску мелких, но критичных нарушений [1, 2].

Особую сложность для судейства представляют динамические элементы с мячом, характеризующиеся высокой скоростью, сложной траекторией и необходимостью синхронной оценки движений гимнастки и предмета. Для полноценной реализации задачи автоматизации оценки таких элементов первоначально необходимо научиться с высокой точностью обнаруживать координаты мяча на видео для последующей обработки.

ОБЗОР ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Задачи детекции и отслеживания мяча представляют собой классическую проблему компьютерного зрения, связанную с обнаружением малогабаритных быстро движущихся объектов в условиях сложного фона, частичных окклюзий и изменяющегося освещения. В контексте художественной гимнастики эта задача усугубляется следующими факторами:

- Малый объект в кадре. При удалении камеры мяч может занимать в кадре мало пикселей.
- Быстрое движение и размытие. Высокие броски дают сильное смазывание на кадрах.
- Сильные окклюзии. Мяч часто перекрывается частями тела гимнастки на короткие интервалы.
- Ложные детекции. Соревновательная сцена и одежда гимнасток создают фоновые шумы, требующие робастной фильтрации.
- Высокие требования к точности для последующего анализа техники.
- Однокамерная система. В рамках данного исследования нет возможности работы с несколькими камерами.

Вместе с тем имеются и некоторые упрощения:

- Необходимость детекции только одного мяча и одной гимнастки.
- Невысокая скорость детектируемого объекта.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В рамках решения задачи был проведен анализ современных компьютерных методов из источников, связанных преимущественно с детекцией мяча в спорте. Особое внимание уделялось подходам, обеспечивающим высокую точность и устойчивость в сложных условиях: при высокой скорости объекта, частичных перекрытиях, изменении освещения и сходстве с фоном.

Исторически первые решения основывались на классических алгоритмах компьютерного зрения, представленных на рисунке 1. Эти методы отличаются вычислительной простотой, однако обладают существенными ограничениями, принцип работы и ключевые ограничения некоторых из них отображены в таблице 1. Их эффективность критически снижается в динамичных сценах со сложным переменным освещением, наличием объектов-помех схожей цветовой гаммы и при сильном размытии. В частности, фильтры (Калмана, частиц), эффективные для линейного и предсказуемого движения, плохо адаптируются к резким нелинейным траекториям и изменению внешнего вида быстро движущегося мяча [3].

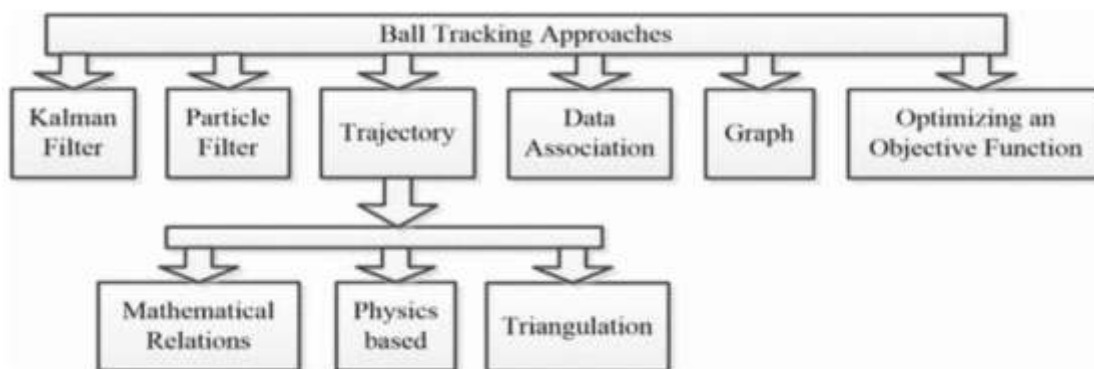


Рисунок 1. Классификация классических подходов к отслеживанию мяча [3, p.1698]

Таблица 1.

Принципы работы и ключевые ограничения основных классических подходов к
отслеживанию объектов

Метод	Принцип работы	Ключевые ограничения для задачи детекции мяча
Цветовые фильтры	Сегментация по заданному цветовому диапазону	Неустойчивость к изменению освещения и схожему фону
KLT-трекер	Отслеживание угловых точек от кадра к кадру	Потеря трека при быстром движении и размытии
Фильтр Калмана	Оптимальная оценка состояния на основе предыдущих данных	Предполагает линейную динамику, что не всегда верно
Фильтр частиц	Оценка состояния на основе набора гипотез (частиц)	Деградация при малом размере цели и схожих помехах

Таким образом, классические методы не отвечают требованиям текущей задачи, где необходима робастность к нестабильным условиям. Вследствие этого акцент в исследованиях сместился в сторону методов на основе глубокого обучения.

Методы на основе глубокого обучения

Современные алгоритмы на основе глубокого обучения можно разделить на две основные архитектурные парадигмы: двухэтапные и одноэтапные детекторы.

Двухэтапные детекторы (например, семейство R-CNN) разделяют процесс на генерацию регионов-кандидатов и их последующую классификацию с уточнением координат. Это обеспечивает высокую точность, но приводит к значительным вычислительным затратам. Одноэтапные детекторы (например, YOLO и SSD) исключают этап предложения регионов, предсказывая ограничивающие рамки (bounding boxes) и классы объектов напрямую за один проход по сети. Это обеспечивает высокую скорость работы, однако может сопровождаться некоторой потерей точности, особенно для малых объектов [4].

Для выбора оптимальной архитектуры был проведен анализ наиболее распространенных моделей.

YOLO (You Only Look Once). Архитектура YOLO относится к одностадийным детекторам, в которых задачи локализации и классификации объектов решаются единой сверточной нейронной сетью, что делает данный подход стандартом для задач

детекции в реальном времени. Архитектура модели YOLOv8 изображена на рисунке 2. По ней исходное изображение обрабатывается backbone-сетью для извлечения признаков, после чего с использованием писк-модуля (PAN/FPN) формируются многоуровневые карты признаков, обеспечивающие детекцию объектов различных масштабов. Detection head предсказывает для каждой ячейки сетки S×S параметры ограничивающей рамки (x,y,w,h), оценку наличия объекта и условные вероятности классов.

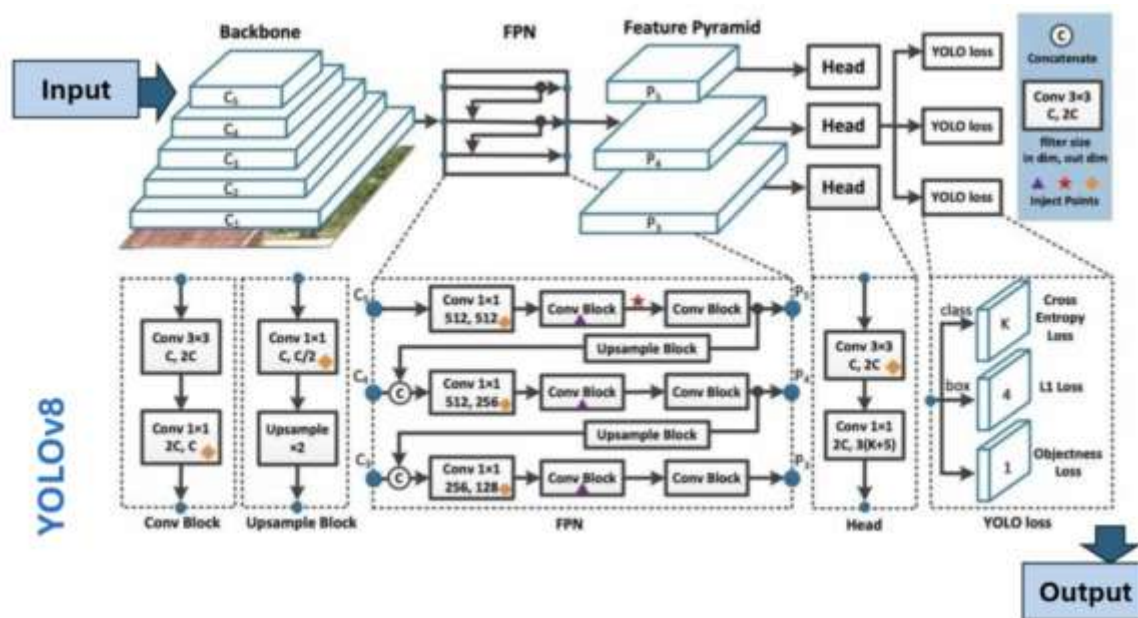


Рисунок 2. Архитектура YOLOv8 [5]

Оценка уверенности обнаружения объекта определяется как произведение вероятности наличия объекта в предсказанной области и меры пересечения предсказанной и истинной ограничивающих рамок (Intersection over Union, IoU) и вычисляется по формуле (1):

$$C = Pr(object) \times IoU_{pred}^{gt}, \quad (1)$$

где $Pr(object)$ – вероятность наличия объекта, IoU_{pred}^{gt} – значение меры пересечения предсказанной и истинной ограничивающих рамок.

Итоговая вероятность принадлежности объекта классу k определяется как произведение оценки уверенности и условной вероятности класса и вычисляется по формуле (2):

$$Pr(class_k) = C \times p_k, \quad (2)$$

где p_k – условная вероятность принадлежности объекта классу k.

Ключевыми преимуществами YOLO являются высокая скорость инференса и возможность end-to-end обучения. Современные версии, включая YOLOv8, демонстрируют улучшенную точность при детекции малых объектов за счёт многоуровневых признаков и оптимизированных функций потерь, что особенно важно для задачи обнаружения мяча на сцене большого масштаба. В то же время эффективность метода может снижаться в условиях сильных окклюзий и размытия движения, что требует применения аугментации данных и тонкой настройки модели [5].

SSD (Single Shot MultiBox Detector). Архитектура SSD, изображенная на рисунке 3, относится к одностадийным детекторам и основывается на использовании сверточной нейронной сети *reduced VGG* в качестве базовой для извлечения признаков. На основе выходных слоёв backbone формируется набор многоуровневых карт признаков, каждая из которых используется для детекции объектов соответствующего масштаба. Для каждой карты признаков задается набор априорных ограничивающих рамок различных масштабов и аспектных отношений. Сеть одновременно предсказывает смещения координат рамок и вероятности принадлежности объекта определённому классу. Обучение SSD осуществляется путём минимизации суммарной функции потерь, включающей компоненты локализации и классификации, которая определяется выражением (3):

$$L = \left(\frac{1}{N}\right) \times (L_{loc} + \alpha \cdot L_{conf}), \quad (3)$$

где N – число априорных рамок, сопоставленных с объектами, L_{loc} – функция потерь локализации (Smooth L1), L_{conf} – функция потерь классификации (кросс-энтропия), α – коэффициент балансировки.

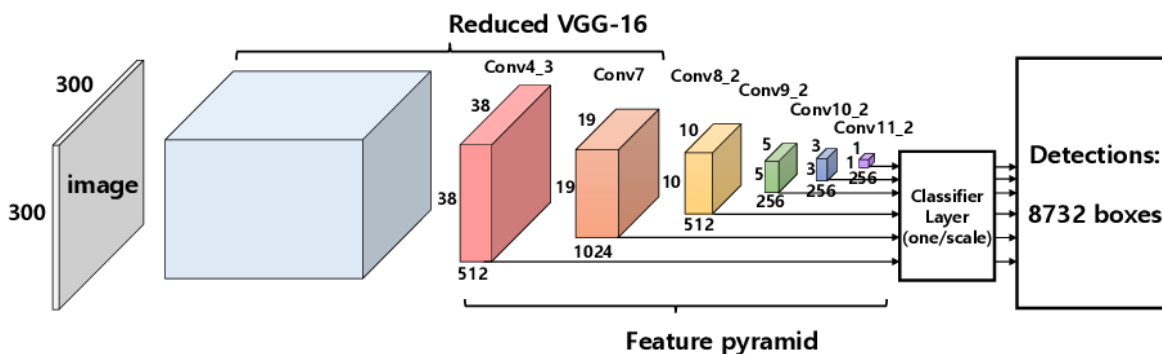


Рисунок 3. Архитектура SSD [6]

Использование многоуровневых карт признаков обеспечивает SSD приемлемый баланс между скоростью и точностью детекции. Однако отсутствие специализированных механизмов усиления признаков для малых объектов

ограничивает эффективность метода при обнаружении очень маленьких и быстро движущихся целей [7].

Семейство R-CNN моделей. Семейство моделей R-CNN относится к двухэтапным методам детекции, в которых процесс обнаружения объектов разделён на этап генерации кандидатов регионов и этап их классификации. В Faster R-CNN генерация регионов осуществляется с помощью сети предложений регионов (Region Proposal Network, RPN), встроенной в общую архитектуру и совместно обучаемой с классификатором. После этого для каждого предложенного региона выполняется операция RoI Align и последующая классификация и регрессия координат ограничивающей рамки. Функция потерь RPN определяется выражением (4):

$$L_{RPN} = L_{cls} + \alpha \cdot L_{reg}, \quad (4)$$

где L_{cls} – функция потерь классификации (объект / фон), L_{reg} – функция потерь регрессии координат рамок (Smooth L1), α – коэффициент балансировки.

В модели Mask R-CNN архитектура дополнительно расширяется ветвью сегментации, что позволяет одновременно решать задачи детекции и попиксельного выделения объектов. Несмотря на высокую точность, особенно в сценах с перекрытиями и сложным фоном, двухэтапные модели характеризуются значительными вычислительными затратами и ограниченной скоростью инференса, что снижает их применимость для задач трекинга в реальном времени на стандартном оборудовании [8-10].

RetinaNet. Это одностадийный детектор, использующий архитектуру Feature Pyramid Network (FPN), которая формирует иерархию карт признаков с различным пространственным разрешением на основе сверточной backbone-сети. Это позволяет эффективно детектировать объекты различных масштабов без необходимости отдельного этапа генерации регионов. Для каждой карты признаков применяются независимые подголовы классификации и регрессии ограничивающих рамок. Ключевой особенностью RetinaNet является использование фокальной функции потерь, определяемой выражением (5), направленной на решение проблемы сильного дисбаланса между фоновыми и объектными примерами.

$$FL(p_t) = -\alpha \cdot (1 - p_t)^\gamma \cdot \log(p_t), \quad (5)$$

где p_t – предсказанная вероятность истинного класса, γ – параметр фокусировки, α – коэффициент балансировки.

Использование FPN в сочетании с фокальной функцией потерь позволяет RetinaNet достигать точности, сопоставимой с двухэтапными детекторами, при

сохранении высокой скорости инференса, что делает данный метод эффективным компромиссом между быстродействием и точностью [11].

Для решения задачи формирования непрерывных траекторий обнаруженного объекта применяется парадигма Tracking-by-Detection (TbD). Она предполагает двухэтапный процесс: независимую детекцию объекта на каждом кадре и последующую ассоциацию этих детекций во времени. Такой подход позволяет компенсировать возможные пропуски детектора и поддерживать идентификатор объекта, что может послужить хорошим улучшением системы.

Эволюция алгоритмов трекинга развивалась от простых и быстрых методов к более сложным, учитывающим особенности внешнего вида объекта:

- **SORT** – использует фильтр Калмана для предсказания положения и пересечение по объединению (IoU) для ассоциации, отличается высокой скоростью, но чувствителен к окклюзиям.
- **DeepSORT** – вводит эмбединги внешнего вида (ReID), что значительно повышает устойчивость к перекрытиям и схожим объектам на сцене.
- **ByteTrack** – ключевым нововведением является ассоциация детекций с низкой уверенностью, что резко повышает полноту треков (MOTA) [12].
- **BoT-SORT** – фокусируется на использовании эмбедингов и коррекции смещения камеры, обладает более стабильной ассоциацией при сложных сценах [13].
- **OC-SORT** – предлагает observation-centric подход к обновлению фильтра Калмана, демонстрируя хорошую устойчивость к нелинейному движению [14].

ОПИСАНИЕ ВЫБРАННОГО РЕШЕНИЯ

На основе проведенного анализа сформирован конвейер обработки, состоящий из двух ключевых и взаимодополняющих модулей: детектора объектов для локализации мяча в каждом кадре и трекера для ассоциации обнаружений во времени.

В качестве основного детектора выбрана модель YOLOv8. Данное решение обосновано следующими факторами:

1. Оптимальное соотношение скорости и точности: архитектура YOLOv8 обеспечивает инференс в режиме, близком к реальному времени, что является обязательным требованием для обработки видеопотоков. При этом она демонстрирует достаточную точность (mAP), особенно после адаптации к конкретной задаче.
2. Доминирование в предметной области: согласно сводным данным, представленным в таблицах 2 и 3, из исследования [4], модели семейства YOLO демонстрируют наилучшие показатели для текущей задачи. Особенно показателен пример волейбола, где условия (высокая скорость малого объекта, частые окклюзии)

наиболее близки к задаче отслеживания мяча в художественной гимнастике и где YOLO-архитектуры стабильно показывают высокую эффективность. Это делает YOLOv8 логичным и обоснованным выбором для нашей методологии.

Таблица 2.

Лучшие алгоритмы детекции мяча для разных видов спорта [4, p.3107]

Sport	Best algorithm	Accuracy/mAP	Inference time	Strengths	Challenges
Football	YOLOv8 (Hybrid Enhancements)	High	Real-time	Handles occlusion, real-time tracking	Issues with distant ball tracking
Tennis	SSD-MobileNet	Medium-high	Fast	Lightweight, CPU-friendly	Sensitive to lighting
Table tennis	Optimized YOLOv3-Tiny	Very high	Very Fast	Great for small object detection	Needs high-res input
Basketball	YOLO-T2LSTM	Very high	Fast	Accurate action recognition	Complex model fusion
Golf	Faster R-CNN	Very high	Slow	High precision tracking	Not real-time capable
Handball	Mask R-CNN	Very high	Slow	High segmentation accuracy	High computational cost
Volleyball	YOLOv3 (Enhanced)	High	Fast	Improved detection of fast-moving objects	Training data limits generalizability
Boccia	Tiny-YOLO	High	Fast	Good color-based accuracy	Lighting sensitivity, narrow FOV
Rugby	YOLOv3	High	Fast	Compact architecture for embedded use	Lower resolution support
Padel	YOLO + Audio SED	High	Fast	Context-aware detection	Audio interference risks
Badminton	YOLO-HGNet	Very high	Fast	Enhanced classification and detection accuracy	Requires tuning and large datasets

Таблица 3.

Сравнение производительностей моделей детекции в спортивных статьях [4, p.3109]

Table 7 Comparative performance metrics of object detection models used in sports applications.

Model	Avg accuracy (%)	Avg inference time (ms)	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)
YOLO (various versions)	85	20	84	82	83
SSD	78	25	76	75	75
Faster R-CNN	90	100	89	91	90
Mask R-CNN	92	120	91	92	91
RetinaNet	87	60	85	83	84
Traditional CV/ML	70	15	65	60	62

3. Удобство адаптации и дообучения: фреймворк Ultralytics предоставляет хорошо документированный и простой в использовании конвейер для настройки предобученных моделей на пользовательских данных. Это позволяет относительно легко адаптировать детектор к специфическому внешнему виду мяча для художественной гимнастики, вариациям освещения и ракурсов.

4. Масштабируемость: в рамках семейства YOLOv8 существует спектр моделей различного размера (от nano до extra-large). Для экспериментов выбраны версии YOLOv8l (large) и YOLOv8x (extra-large), так как они обеспечивают значительный прирост точности по сравнению с облегченными вариантами, сохраняя приемлемую для исследований скорость работы [15].

Алгоритмы, ориентированные на сцены с множеством объектов (BoT-SORT) или требующие стабильных наблюдений (OC-SORT), в данных условиях могут показать худшие результаты при длительных пропаданиях. ByteTrack, напротив, эффективно поддерживает целостность трека и корректно восстанавливает траекторию при кратковременных окклюзиях и пропаданиях, что случается довольно часто в контексте художественной гимнастики. Дополнительными практическими преимуществами являются его вычислительная эффективность и простота интеграции с YOLOv8. Поэтому для ассоциации объектов, обнаруженных дообученной YOLOv8, между кадрами выбран алгоритм ByteTrack, в качестве альтернативы для сравнения будет рассматриваться алгоритм OC-SORT.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сбор и подготовка данных

Первостепенной задачей стала разметка кастомного датасета для дообучения выбранной модели. В качестве вспомогательного инструмента интерактивной аннотации изображений была выбрана платформа Roboflow с расширением Roboflow Auto Label [16], сама разметка по большей части велась вручную.

Итого для обучения был создан датасет, состоящий из 2383 изображений по 20-ти видео с различных соревнований, с разными освещением, камерами, расстояниями до объекта. Также был выбран большой процент кадров с частичными окклюзиями (до 80%), размытиями и частичными потерями объекта. Сам датасет был разделен в соотношениях: 72 % – train, 14 % – validation, 14 % – test.

В процессе препроцессинга были применены такие приемы аугментации данных, как: случайное размытие, коррекция яркости, горизонтальное отражение и случайное кадрирование, так как исследования показали, что аугментация повышает способность модели обобщать данные и делают ее более устойчивой к шумам [17].

Дообучение моделей

Для дообучения и последующего тестирования были выбраны две крупные модели семейства YOLOv8: YOLOv8l (large) и YOLOv8x (extra large). Обучение проводилось в среде Google Colab на GPU T4. Обучение для YOLOv8l проводилось на 20-ти эпохах с размером батча равным 20.

Критерии остановки: обучение модели было остановлено после 20-ти эпох, так как функция потерь на валидационной выборке перестала уменьшаться, а метрики качества улучшаться. Общее время обучения составило около 1.5 часов. Результаты представлены на рисунке 4.

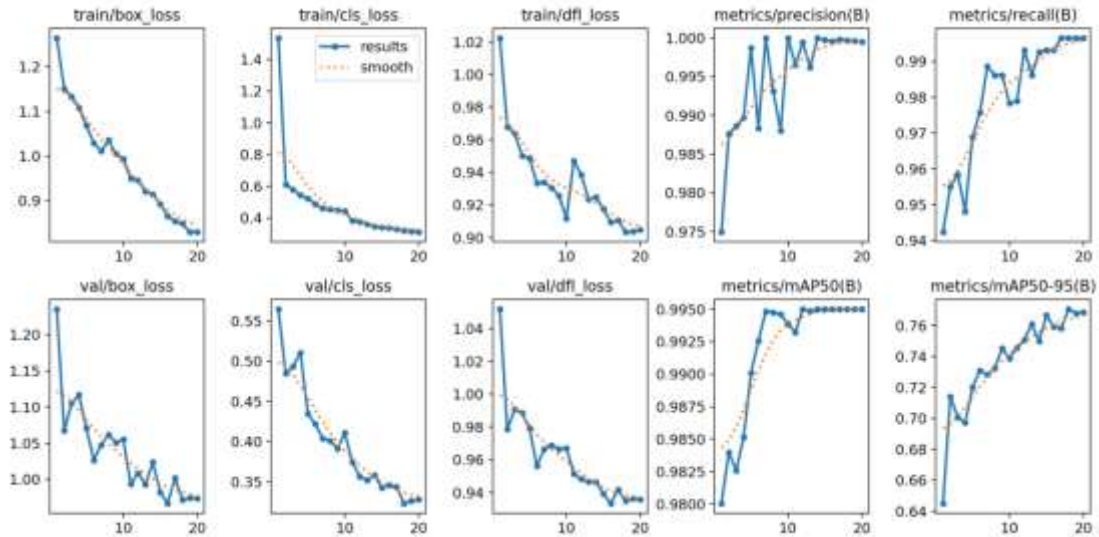


Рисунок 4. Изменение основных метрик во время дообучения YOLOv8l

На рисунке 5 представлено сравнение оригинальной и дообученной моделей. Заметны значительный улучшения по всем метрикам, главное – рост mAP_{50-95} с 0,46 до 0,77.

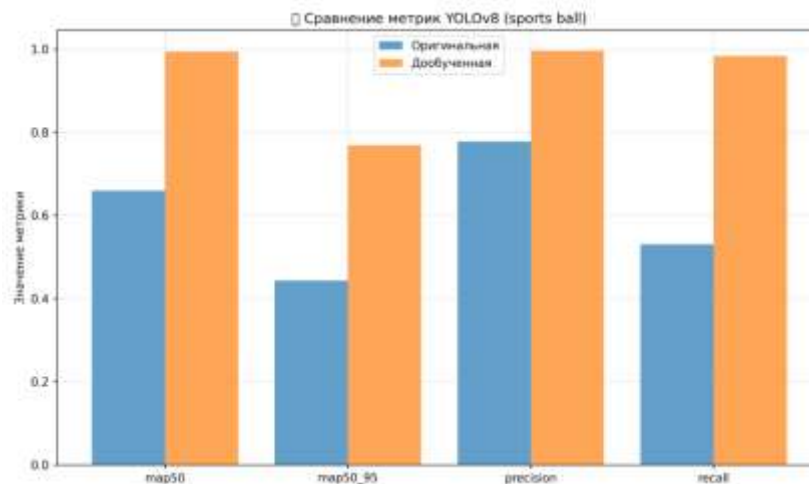


Рисунок 5. Сравнение метрик оригинальной и дообученной YOLOv8l

Параметры обучения для YOLOv8x были аналогичны, кроме количества эпох, их было 15. Обучение YOLOv8x заняло около 3 часов, что связано с большим размером модели.

Получившиеся результаты сравнения всех четырех моделей по основным метрикам представлены на рисунках 6 и 7.

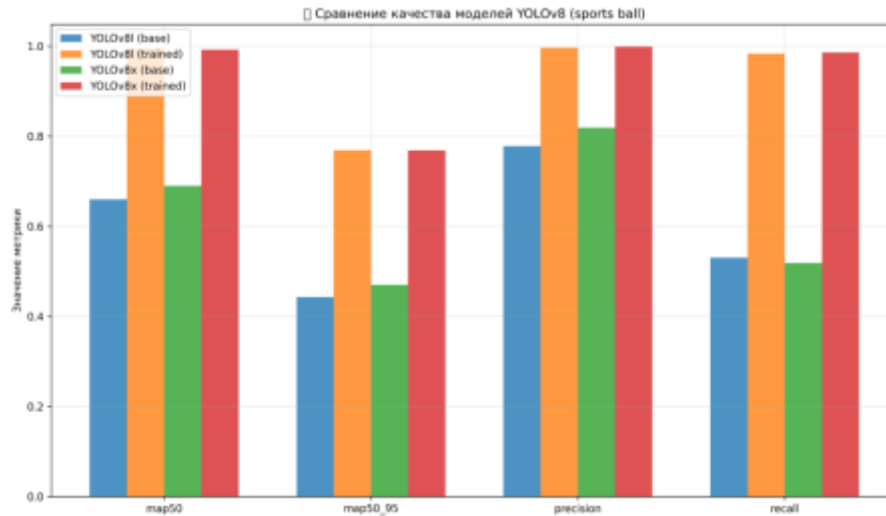


Рисунок 6. Диаграмма сравнения моделей по метрикам mAP, precision, recall

ИТОГОВОЕ СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ:

Модель	mAP50	mAP50-95	Precision	Recall	Speed(ms)
YOLOv8l (base)	0.660	0.443	0.778	0.530	37.64
YOLOv8l (trained)	0.994	0.769	0.996	0.984	38.88
YOLOv8x (base)	0.690	0.470	0.819	0.519	62.30
YOLOv8x (trained)	0.992	0.768	0.999	0.986	60.41

ЛУЧШИЕ МОДЕЛИ ПО КРИТЕРИЯМ:

- mAP50 : YOLOv8l (trained) (0.994)
- mAP50_95 : YOLOv8l (trained) (0.769)
- precision : YOLOv8x (trained) (0.999)
- recall : YOLOv8x (trained) (0.986)

Самая быстрая модель: YOLOv8l (base) (37.64 ms)

Рисунок 7. Численное сравнение моделей по ключевым метрикам

Метрики вычислялись автоматически по тестовой выборке на основе сравнения предсказанных и эталонных ограничивающих рамок. Предсказание считалось корректным, если значение меры пересечения IoU (отношение между предсказанной и эталонной рамками) превышало заданный порог. На основе IoU вычислялись основные метрики: precision – отношение числа корректных детекций к общему числу предсказаний, recall – отношение числа корректных детекций к числу объектов в тестовой выборке, average precision (AP) – площадь под кривой precision–recall при фиксированном пороге IoU, mAP@0.5 – среднее значение AP при IoU ≥ 0.5, mAP@0.5:0.95 - среднее значение AP при порогах IoU от 0.5 до 0.95 с шагом 0.05. Время инференса вычислялось как среднее время обработки одного изображения моделью на тестовой выборке.

Все метрики продемонстрировали значительный рост после дообучения. Модель научилась находить мяч в сложных условиях, где базовая модель его пропускала.

Сравнивая модели YOLOv8l и YOLOv8x, можно заметить, что после дообучения обе модели показали исключительно высокие и практически идентичные результаты по mAP@0.5 (~0.99). YOLOv8x демонстрирует относительно небольшое преимущество в метриках precision и recall (0.999 и 0.986 против 0.996 и 0.984 у YOLOv8l), что ожидаемо в связи с ее большей емкостью. Ключевым отличием является скорость работы. YOLOv8l обрабатывает изображение за 38.88 мс, что примерно на 35% быстрее, чем YOLOv8x (60.41 мс). Это критически важно для систем реального времени.

Качественный анализ и обоснование выбора модели

На основе количественных метрик в качестве оптимальной была выбрана модель YOLOv8l:

1. Практическая эквивалентность точности: разница в mAP@0.5 между YOLOv8l и YOLOv8x составляет 0.002.
2. Преимущество в скорости: YOLOv8l значительно быстрее, что позволяет обрабатывать видео с более высоким FPS.
3. Эффективность по ресурсам: меньший размер модели делает ее более предпочтительной для развертывания в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Качественные улучшения дообученной YOLOv8l:

- Устойчивость к окклюзиям: модель успешно детектирует мяч, даже когда он перекрыт телом гимнастки на 70-80% (рисунок 8).
- Работа с размытием: алгоритм стабильно находит мяч на кадрах с размытием, где базовая модель теряет объект.
- Стабильность трекинга: улучшенная метрика recall напрямую ведет к более стабильному трекингу, так как мяч реже теряется при выходе из кадра или кратковременном перекрытии.

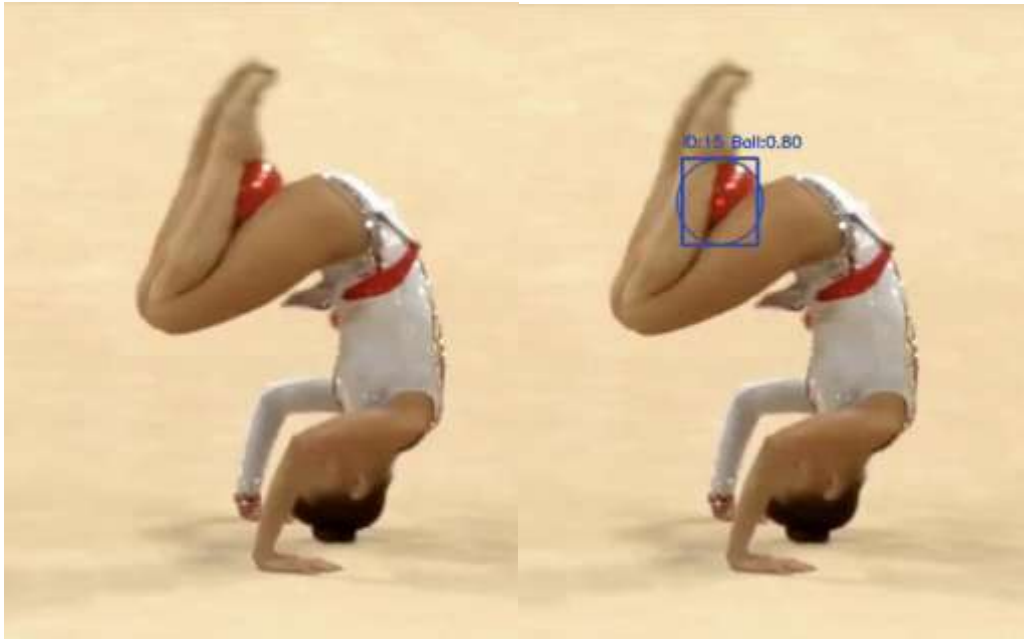


Рисунок 8. Результат детекции до и после дообучения YOLOv8l

Улучшение с помощью Track-by-detection

Интеграция алгоритма ByteTrack с дообученной моделью YOLOv8 позволила достичь значительных улучшений в системе трекинга мяча для художественной гимнастики. Количественные результаты продемонстрировали снижение количества переключений идентификаторов (ID switches) на 85-90% – с 45 до 2-5 переключений на 100 кадров по 20-ти тестовым видео, что напрямую повышает стабильность отслеживания.

Также зафиксировано увеличение длины трека, что свидетельствует о способности системы сохранять идентификатор объекта при временных окклюзиях и выходах за пределы кадра. Стоит отметить, что при использовании OC-SORT данный показатель составил в среднем 12–18 переключений на 100 кадров, а средняя длина трека вдвое меньше, чем у ByteTrack.

Практическое сравнение результатов, представленное на рисунке 9, демонстрирует преимущества интеграции алгоритма ByteTrack. В первом ряду с изображениями отслеживания без использования ByteTrack наблюдаются частые потери объекта между последовательными кадрами с последующим ошибочным присвоением новых идентификаторов. В отличие от этого, результаты с применением ByteTrack (второй ряд изображений) характеризуются поддержанием идентификации объекта даже в условиях его временного исчезновения. Алгоритм демонстрирует способность корректной реидентификации при повторном появлении объекта,

сохраняя первоначальный идентификатор, что подтверждает его эффективность для задач непрерывного отслеживания в динамических сценах.



Рисунок 9. Результаты до и после использования алгоритма ByteTrack

Итоги

Получившийся в результате работы алгоритм представлен на рисунке 10. Архитектура и принципы работы детектора YOLOv8 были рассмотрены выше, поэтому далее будет описана работа модуля ByteTrack. Для каждого активного трека применяется фильтр Калмана для прогнозирования положения на следующий кадр. Модель состояния включает координаты и скорости объекта, а предсказание осуществляется по линейной динамической модели. Далее детекции YOLOv8 разделяются на высоко и низко вероятные, и ассоциация выполняется в два этапа. На первом этапе высоко вероятные детекции ассоциируются с предсказанными треками по метрике IoU с использованием алгоритма венгерского назначения. На втором этапе оставшиеся несопоставленные треки пытаются ассоциировать с низковероятными детекциями. Успешно ассоциированные детекции обновляют состояние трека через фильтр Калмана. Треки, оставшиеся несопоставленными, увеличивают счетчик потерь, а при превышении определенного порога удаляются [12].

Эффективность предложенного подхода обусловлена сочетанием специализированного детектора и вероятностной модели движения. Дообучение YOLOv8 на кастомном датасете существенно увеличило полноту детекций и устойчивость к размытиям и перекрытиям, тем самым улучшая качество наблюдений.

ByteTrack, в свою очередь, реализует байесовскую временную фильтрацию, объединяя эти наблюдения с априорной моделью движения. Двухуровневая ассоциация детекций позволила восстановить траекторию даже при деградации уверенности детектора, а предсказание фильтра Калмана обеспечило непрерывность трека в условиях временного отсутствия мяча в кадре.

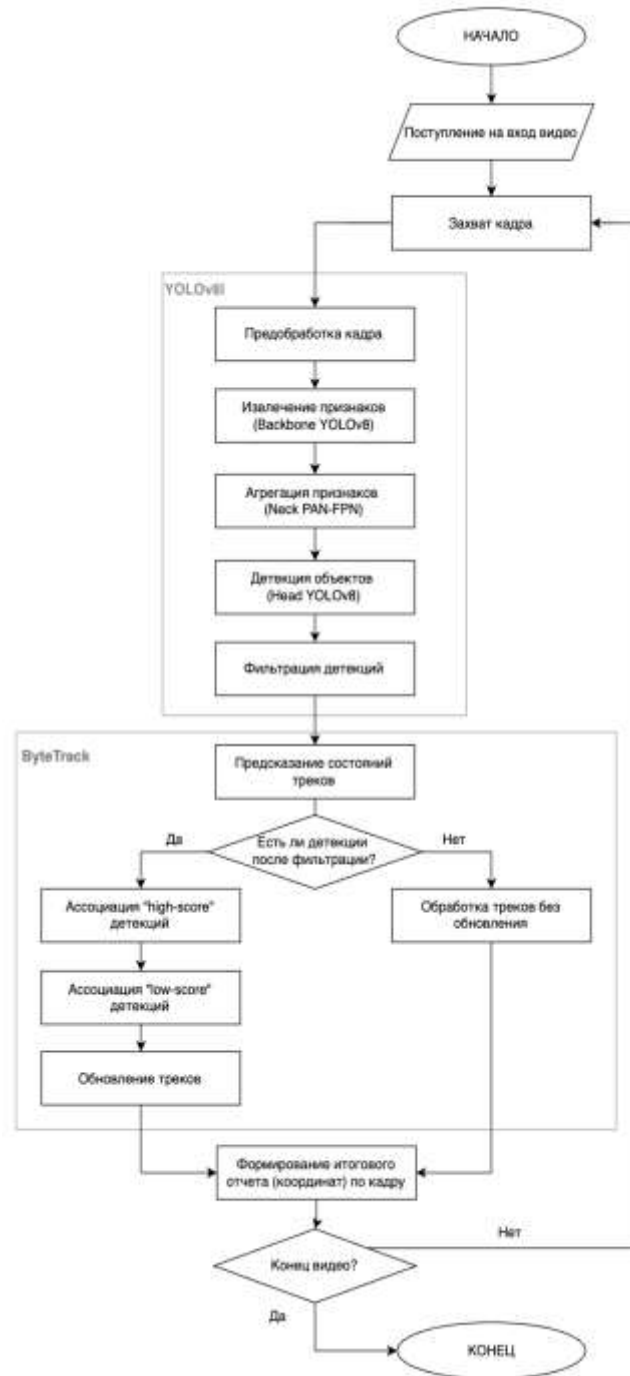


Рисунок 10. Блок-схема алгоритма детекции и отслеживания мяча на видео

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, был разработан и экспериментально исследован алгоритм автоматической детекции и отслеживания мяча на видео в художественной гимнастике, основанный на комбинации дообученной модели YOLOv8l и трекера ByteTrack. Проведенные эксперименты показали, что адаптация YOLOv8 к специализированному датасету позволила добиться высокой точности обнаружения мяча, устойчивости к размытию, окклюзиям и сложному фону. Использование ByteTrack обеспечило значительное улучшение стабильности трекинга и снижение числа переключений идентификаторов, что позволило формировать непрерывные и корректные траектории движения мяча.

Полученный алгоритм представляет собой надежную основу для построения систем автоматизированного анализа и оценки динамических элементов в художественной гимнастике. В частности, он может быть использован для вычисления параметров бросков и ловли мяча, анализа траекторий и синхронизации движений гимнастки и предмета, что открывает возможности для объективной поддержки судейства и спортивной аналитики.

References

1. Boksem M. A. S., Meijman T. F., Lorist M. M. Effects of mental fatigue on attention: an ERP study //Cognitive brain research. – 2005. – Т. 25. – №. 1. – С. 107-116.
2. Flessas K. et al. Judging the judges' performance in rhythmic gymnastics //Medicine & Science in Sports & Exercise. – 2015. – Т. 47. – №. 3. – С. 640-648.
3. Kamble P. R., Keskar A. G., Bhurchandi K. M. Ball tracking in sports: a survey //Artificial Intelligence Review. – 2019. – V. 52. – N. 3. – P. 1655-1705.
4. Moreira C., Ferreira L., Coelho P. J. A comprehensive review of ball detection techniques in sports //PeerJ Computer Science. – 2025. – V. 11. – P. 3109.
5. Sapkota R., Karkee M. Ultralytics YOLO Evolution: An Overview of YOLO26, YOLO11, YOLOv8 and YOLOv5 Object Detectors for Computer Vision and Pattern Recognition //arXiv preprint arXiv:2510.09653. – 2025.
6. Jeong J., Park H., Kwak N. Enhancement of SSD by concatenating feature maps for object detection //arXiv preprint arXiv:1705.09587. – 2017.
7. Liu W. et al. Ssd: Single shot multibox detector //European conference on computer vision. – Cham : Springer International Publishing, 2016. – С. 21-37.
8. Ren S. et al. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks //Advances in neural information processing systems. – 2015. – Т. 28.

9. He K. et al. Mask r-cnn //Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – С. 2961-2969.
10. Buric M., Pobar M., Ivasic-Kos M. Ball detection using YOLO and Mask R-CNN //2018 International conference on computational science and computational intelligence (CSCI). – IEEE, 2018. – P. 319-323.
11. Lin T. Y. et al. Focal loss for dense object detection //Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – P. 2980-2988.
12. Zhang Y. et al. Bytetrack: Multi-object tracking by associating every detection box //European conference on computer vision. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2022. – С. 1-21.
13. Aharon N., Orfaig R., Bobrovsky B. Z. BoT-SORT: Robust associations multi-pedestrian tracking //arXiv preprint arXiv:2206.14651. – 2022.
14. Cao J. et al. Observation-centric sort: Rethinking sort for robust multi-object tracking //Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2023. – С. 9686-9696.
15. Ultralytics YOLOv8 Documentation [Электронный ресурс] : [официальная документация] / Ultralytics. – 2023. – URL: <https://docs.ultralytics.com/ru/models/yolov8/#performance-metrics> (дата обращения: 06.01.2026).
16. Журавлёв А. К., Григорян К. А. Автоматическая разметка обучающих выборок в компьютерном зрении с использованием методов машинного обучения //Электронные библиотеки. – 2024. – Т. 27. – №. 5. – С. 718-729.
17. Shorten C., Khoshgoftaar T. M. A survey on image data augmentation for deep learning //Journal of big data. – 2019. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-48.

UDC 621.395.74

Kadushin A.Yu., Dementyev V.E., Sobolev N.S. Optimization of cellular mobile network parameters

Оптимизация параметров сети сотовой подвижной связи

Kadushin A.Yu.,
Master's Student

Dementyev V.E.,
Associate Professor, Doctor of Engineering

Sobolev N.S.
Senior Lecturer
N.P. Ogarev Moscow State University

Кадушин А.Ю.,
магистрант
Дементьев В.Е.,
доцент, д.т.н.,
Соболев Н.С.

ст. преподаватель
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»

Abstract. This article provides an analytical review of methods for optimizing the parameters of cellular networks. It examines the evolution of approaches, from manual configuration to automated SON systems and intelligent solutions based on machine learning. The article analyzes key radio access parameters and typical network problems, such as interference, uneven load distribution, and dead zones. The article concludes that it is necessary to implement autonomous cognitive systems to ensure the quality of service and efficient use of resources in 5G and future-generation networks.

Keywords: cellular communication, optimization, RAN, QoS, SON, interference.

Аннотация. В данной статье выполнен аналитический обзор методов оптимизации параметров сетей сотовой связи. Рассмотрена эволюция подходов: от ручной настройки к автоматизированным системам SON и интеллектуальным решениям на основе машинного обучения. Проанализированы ключевые параметры радиодоступа и типовые проблемы сетей: интерференция, неравномерность нагрузки, «мертвые зоны». Сделан вывод о необходимости внедрения автономных когнитивных систем для обеспечения качества обслуживания и эффективного использования ресурсов в сетях 5G и последующих поколений.

Ключевые слова: сотовая связь, оптимизация, RAN, QoS, SON, интерференция

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Современные сети сотовой подвижной связи представляют собой высокодинамичные распределённые системы, функционирующие в условиях постоянного роста объёма передаваемых данных, увеличения плотности абонентов и усложнения спектральной обстановки. Развитие технологий LTE-Advanced и сетей пятого поколения привело к резкому ужесточению требований к пропускной способности, задержкам, устойчивости соединений и энергетической эффективности.

В этих условиях эффективность функционирования сети всё в большей степени определяется не столько архитектурными особенностями, сколько качеством настройки её управляющих параметров. Практика эксплуатации показывает, что даже при корректно выполненном радиопланировании неоптимальные значения мощности передатчиков, углов наклона антенн, порогов переключения между сотами и параметров управления радиоресурсами способны существенно снизить интегральные показатели качества обслуживания.

Оптимизация параметров сети сотовой связи представляет собой сложную многокритериальную задачу. Её цель — достижение баланса между ключевыми показателями эффективности: максимизацией пропускной способности, обеспечением минимальных задержек и поддержанием уровня межсотовых помех в допустимых пределах. Приоритизация этих противоречивых требований определяется оператором на основе текущих эксплуатационных задач, что позволяет сформировать единый комплексный критерий эффективности. Этот критерий является взвешенной композицией частных показателей, отражающих среднюю пропускную способность, интегральное качество обслуживания и интенсивность интерференции.

Поиск оптимальных значений управляющих параметров ведётся в пространстве, ограниченном рядом технических и регуляторных условий. К ним относятся пределы излучаемой мощности, установленные нормативами, а также специфика зоны покрытия — рельеф местности и наличие стационарных препятствий, которые объективно влияют на распространение радиоволн.

Традиционные методы оптимизации основывались преимущественно на результатах полевых измерений и анализе статистических данных сети. Несмотря на высокую точность локальных корректировок, такие подходы характеризуются значительной трудоёмкостью и высокой стоимостью. Возрастающая плотность размещения базовых станций и рост числа сот привели к тому, что ручные методы перестали быть масштабируемыми, а их применение стало носить реактивный, а не проактивный характер. Это обусловило развитие автоматизированных механизмов, известных как самоорганизующиеся сети, которые обеспечивают непрерывную адаптацию радиопараметров к изменяющимся условиям функционирования.

В рамках самоорганизующихся сетей реализуются алгоритмы автоматической балансировки нагрузки, оптимизации мобильности и совместной настройки зон покрытия и ёмкости. Эти механизмы работают на основе замкнутых контуров управления и используют в качестве входных данных показатели загрузки каналов, статистику успешности соединений, частоту обрывов и параметры измерений, выполняемых абонентскими устройствами. Переход от статической конфигурации к

динамической адаптации позволил существенно снизить долю аварийных ситуаций и повысить стабильность работы сети в периоды пиковых нагрузок. Однако детерминированная природа таких алгоритмов ограничивает их способность учитывать сложные нелинейные зависимости между параметрами.

Интеграция методов машинного обучения и искусственного интеллекта открыла новые возможности в области оптимизации радиопараметров. Использование алгоритмов обучения с подкреплением позволяет рассматривать сеть как динамическую среду, а процедуру настройки параметров — как последовательность действий, направленных на максимизацию долгосрочной награды. В этом контексте состояние среды определяется вектором параметров, включающим значения уровня сигнала, отношения сигнал–помеха, текущую загрузку ресурсов и показатели качества обслуживания. Преимущество данного подхода заключается в способности системы накапливать опыт и самостоятельно формировать стратегии управления, которые оказываются устойчивыми к быстроменяющимся условиям радиосреды.

Практическая реализация интеллектуальной оптимизации требует особого внимания к качеству исходных данных. Для этого используются технологии минимизации объёма полевых измерений, что позволяет собирать измерительную информацию непосредственно с абонентских устройств. Дополнительную роль играют средства корреляционного анализа и подавления выбросов, благодаря которым обеспечивается устойчивость моделей к случайным искажениям информации. В результате формируются обучающие выборки, пригодные для построения моделей прогнозирования и принятия решений.

Одним из перспективных направлений является концепция цифрового двойника сети, представляющего собой виртуальную копию радиосети, функционирующую в программной среде. Такая модель позволяет безопасно тестировать новые алгоритмы оптимизации, моделировать экстремальные нагрузки и анализировать последствия изменения параметров без риска нарушения предоставления услуг реальным абонентам. Это особенно важно для сетей пятого поколения, где требования к задержке и надёжности значительно выше по сравнению с предыдущими стандартами.

Аналитические оценки и результаты экспериментальных внедрений показывают, что использование интеллектуальных алгоритмов управления позволяет добиться увеличения средней спектральной эффективности на 15–25 %, а также сокращения доли неуспешных процедур обслуживания примерно на 20–30 %. Эти показатели подтверждают целесообразность дальнейшего развития автономных систем управления сетями связи и подчёркивают важность комплексного подхода,

сочетающего классические инженерные методы и современные инструменты анализа данных.

Дополнительной задачей оптимизации является обеспечение устойчивости сети к нештатным ситуациям, включая появление новых источников помех, отказ оборудования и резкие скачки трафика. Для этого разрабатываются механизмы резервирования параметров и автоматического восстановления конфигураций. Такие механизмы позволяют сократить время восстановления работоспособности и минимизировать последствия аварийных ситуаций для абонентов.

В совокупности рассмотренные методы формируют основу для перехода от традиционных сетей к автономным интеллектуальным системам связи, способным к самообучению и самоадаптации. Это особенно актуально в условиях перехода к шестому поколению мобильной связи, где ожидается дальнейший рост требований к скорости передачи данных, плотности подключений и энергетической эффективности.

Следует отметить, что процесс оптимизации параметров сети не является разовой процедурой, а представляет собой непрерывный цикл мониторинга, анализа, принятия решений и корректировки конфигураций. В реальных условиях эксплуатации параметры радиосреды подвержены влиянию большого числа факторов, включая сезонные изменения условий распространения радиоволн, увеличение плотности застройки, появление новых источников электромагнитных помех и изменение поведения абонентов. Эти факторы приводят к тому, что параметры, оптимальные в один период времени, могут оказаться неэффективными в другой временной интервал, что обуславливает необходимость построения адаптивных систем управления.

Особое значение приобретает задача согласования локальной и глобальной оптимизации. Локальные алгоритмы, нацеленные на улучшение параметров отдельной соты, в ряде случаев могут приводить к ухудшению работы соседних сот, увеличению интерференции и возникновению конфликтных сценариев. В этой связи актуальным является формирование иерархических систем управления, в рамках которых нижний уровень отвечает за оперативные коррекции параметров конкретных базовых станций, а верхний уровень осуществляет координацию решений на уровне кластеров и всей сети. Такой подход позволяет избежать эффекта «локальных оптимумов» и обеспечивает устойчивость глобальных характеристик сети.

Значительное внимание в современных исследованиях уделяется энергетической эффективности сетей сотовой связи. Рост числа базовых станций и плотности размещения оборудования приводит к увеличению суммарного энергопотребления, что оказывает влияние как на эксплуатационные расходы операторов, так и на экологические аспекты функционирования телекоммуникационной инфраструктуры. В

рамках оптимизации параметров сети рассматриваются методы динамического управления мощностью передачи, адаптивного отключения избыточных радиомодулей в периоды низкой нагрузки и интеллектуального распределения трафика с учётом энергетических характеристик элементов сети. Это направление приобретает особую актуальность в контексте реализации концепции «зелёных» сетей связи.

Отдельного внимания заслуживают вопросы взаимодействия радиосегмента сети с транспортной и опорной частью инфраструктуры. В условиях роста пропускной способности радиоинтерфейса возникают дополнительные требования к пропускной способности линий связи между базовыми станциями и узлами агрегации. Несогласованность параметров этих сегментов может приводить к возникновению узких мест, увеличению задержек и деградации качества обслуживания. В рамках комплексной оптимизации всё чаще применяются межуровневые методы управления, учитывающие состояние как радиодоступа, так и транспортной сети. Такой подход позволяет добиться более равномерного распределения нагрузки и повышения общей эффективности системы.

Практическая реализация процессов оптимизации требует разработки надёжных механизмов контроля и верификации принимаемых решений. Это связано с тем, что некорректные изменения конфигураций способны привести к массовым отказам обслуживания и существенным финансовым потерям. В современных системах управления внедряются многоуровневые механизмы проверки корректности параметров, включающие имитационное моделирование, тестирование в контролируемых сегментах сети и обязательное наличие процедур автоматического возврата к предыдущим конфигурациям. Данные механизмы являются важным элементом обеспечения надёжности при внедрении интеллектуальных систем управления.

Важным направлением развития является унификация интерфейсов и протоколов взаимодействия между модулями оптимизации и элементами сети. Стандартизация, осуществляемая в рамках международных консорциумов, направлена на обеспечение совместимости решений различных производителей и снижение зависимости операторов от конкретных вендоров. Это создаёт предпосылки для формирования открытых экосистем, в рамках которых интеллектуальные алгоритмы могут быть интегрированы в существующую инфраструктуру с минимальными затратами и рисками.

В совокупности рассмотренные направления демонстрируют, что оптимизация параметров сети сотовой подвижной связи является междисциплинарной задачей, объединяющей методы радиотехники, теории управления, анализа данных и системной

инженерии. Дальнейшее развитие данной области связано не только с совершенствованием алгоритмов, но и с формированием новых организационно-технических подходов к эксплуатации сетей связи, подготовкой специалистов нового поколения и развитием нормативной базы.

Оптимизация параметров сети сотовой подвижной связи является ключевым фактором повышения эффективности современного телекоммуникационного хозяйства. Переход от ручных методов настройки к интеллектуальным алгоритмам управления позволяет обеспечить устойчивость сети, повышение качества обслуживания и рациональное использование радиочастотного спектра. Дальнейшее развитие данной области связано с созданием объяснимых моделей машинного обучения, совершенствованием цифровых двойников и разработкой стандартов безопасной интеграции интеллектуальных систем в действующую инфраструктуру.

References

1. Раппапорт, Т. С. Беспроводная связь: принципы и практика / Т. С. Раппапорт. – 2-е изд., пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с.
2. Гельгор, А. Л., Гурьев, А. В. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура / А. Л. Гельгор, А. В. Гурьев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2019. – 416 с.
3. 3GPP TR 36.902. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions. – V17.0.0 (2022-03).
4. Самуйлов, К. Э., Муравьев, К. М. Методы самоорганизации в сетях LTE. Теория и практика / К. Э. Самуйлов, К. М. Муравьев. – М. : Горячая линия – Телеком, 2016. – 246 с.
5. Klaine, P. V., Nadas, J. P. B., Souza, R. D., & Imran, M. A. A Survey of Machine Learning Techniques Applied to Self-Organizing Cellular Networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19, № 4.
6. O-RAN Alliance. O-RAN Architecture Description. – Document № O-RAN.WG1.OAD-R003-v10.00, 2023.

UDC 630

Kopylov S.V. The main areas of use of unmanned aerial vehicles in the forestry industry

Основные сферы использования беспилотных летательных аппаратов в лесной отрасли

Kopylov Sergey Vitalievich

Lesnaya Fabrika
Копылов Сергей Витальевич
Лесная фабрика

Abstract. *The article is devoted to the use of unmanned aerial vehicles for monitoring the state of forest stands at various stages of reforestation. The paper examines modern types of UAVs (multirotor and fixed-wing) and their technical capabilities: flight range, operating duration, spatial resolution of the acquired data. The results of practical studies on the use of UAVs in various regions (the Kostroma Region, the Arkhangelsk Region, the Altai Republic, Heilongjiang Province in China, etc.) are presented.*

Keywords: *unmanned aerial vehicles (UAVs), reforestation, forest stand monitoring, multirotor UAVs, fixed-wing UAVs, RGB cameras, multispectral cameras, lidars.*

Аннотация. *Статья посвящена применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для мониторинга состояния лесных культур на различных этапах лесовосстановления. В работе рассматриваются современные типы БПЛА (мультироторные и самолётного типа) и их технические возможности: дальность полёта, продолжительность работы, пространственное разрешение получаемых данных. Приводятся результаты практических исследований использования БПЛА в разных регионах (Костромская область, Архангельская область, Республика Алтай, провинция Хэйлуцзян в Китае и др.).*

Ключевые слова: *беспилотные летательные аппараты (БПЛА), лесовосстановление, мониторинг лесных культур, мультироторные БПЛА, БПЛА самолётного типа, RGB-камеры, мультиспектральные камеры, лидары.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Актуальность темы исследования обусловлена ростом площадей вырубок и необходимостью эффективного контроля лесовосстановления; ограничения традиционных наземных методов мониторинга; потенциал БПЛА для получения оперативных и точных данных.

Многофункциональные цифровые платформы — именно так сегодня можно охарактеризовать беспилотные летательные аппараты, которые коренным образом изменили подход к управлению лесным хозяйством. Мониторинг состояния древесного покрова, учёт лесных ресурсов, противодействие пожарам, выявление несанкционированных вырубок и контроль над восстановлением зелёных массивов — всё это теперь входит в круг задач, решаемых с помощью БПЛА.

Немаловажную роль в этом сыграл накопленный опыт эксплуатации подобных систем как непосредственно в лесной сфере, так и в смежных отраслях. Примечательно, что ещё сравнительно недавно беспилотные авиационные системы

воспринимались лесной отраслью с немалой долей скептицизма, однако стремительный технологический прогресс переломил ситуацию — и сегодня данный сектор занимает лидирующие позиции по темпам внедрения беспилотных технологий в России.

Накопленная практика позволила выстроить рабочие методики применения БПЛА, адаптировать аппаратные платформы и программное обеспечение под профильные задачи отрасли, а также сформировать кадровый контур: специалистов, которые владеют не только пилотированием, но и компетенциями, востребованными именно в лесном секторе.

На сегодняшний день БПЛА закрывают довольно широкий перечень прикладных задач: пожарный мониторинг, таксационные обследования, разведка территорий под лесохозяйственные работы и оценка их результатов, обследование уже отведённых лесосек.

В контуре охранно-контрольных задач БПЛА используются для обнаружения самовольных рубок, контроля соблюдения арендных границ и проверки состояния особо охраняемых природных территорий. Отдельный значимый блок — восстановление лесного фонда: оценка приживаемости посадочного материала, учёт саженцев, формирование планов лесовосстановительных мероприятий. Параллельно с этим обеспечивается противопожарный контур — раннее обнаружение очагов горения и проверка фактического исполнения профилактических мероприятий.

Эффективность беспилотных технологий в самых разных областях уже не вызывает сомнений и подкреплена обширной доказательной базой. Горизонты их применения продолжают расширяться: так, сотрудничество компании «Геоскан» с Рослесозащитой открывает принципиально новые возможности для лесной отрасли. В рамках заключённого соглашения планируется внедрить мультиспектральную аэросъёмку в связке с алгоритмами искусственного интеллекта, что позволит на ранних стадиях выявлять очаги поражения лесных насаждений вредителями и фиксировать иные виды повреждений.

Если говорить о примерах, то в прошлом году «Геоскан» выполнил на Сахалине первый в РФ проект по оценке результатов лесовосстановления с помощью дрона и собственного специализированного ПО «Бор». Пермская ЦБК использует беспилотники с лидарами (LiDAR — англ. Light Detection and Ranging, «обнаружение и определение дальности с помощью света» для создания цифровых двойников леса, являясь одним из флагманов в этом направлении[2].

Так, в 2024 году Кольская ГМК успешно опробовала дроны для посева семян сосны и ели с воздуха, а годом ранее в Курганской области беспилотные аппараты

помогли справиться с нашествием звёздчатого пилильщика-ткача, обработав значительные площади лесного фонда.

Помимо этого, беспилотные летательные аппараты всё активнее задействуются в сфере надзора и контроля. Спектр их применения здесь весьма широк: от оперативного мониторинга происходящего и документирования выявленных нарушений до сбора необходимых данных для последующего расчёта причинённого ущерба.

Так, например, аэрофотосъёмка позволяет с высокой геодезической точностью установить масштабы несанкционированных лесозаготовок и выявить нарушения границ, арендованных или переданных в пользование лесных территорий.

В отрасли немало примеров территорий, на которых классические наземные методы обследования заведомо нерезультативны — или вовсе нереализуемы. Именно в таких ситуациях беспилотные платформы раскрываются в полной мере: особенно если речь идёт не о фиксации общедоступных сведений, а о детальном инвентаризационном анализе с точностью, достаточной для последующих расчётов.

К таким объектам относятся, в частности, территории сезонной транспортной доступности: зимой к ним выходят по ледовым переправам и зимникам, а в летний сезон альтернативы дистанционному зондированию просто нет. Отдельный класс — участки, ранее доступные без затруднений, но к моменту проведения работ ставшие непроходимыми по природным причинам.

Применительно к одной из обследованных территорий выполнение наземной таксации в принципе оказалось невозможным: тайфуны размыли подъездные дороги, а ветровалы окончательно перекрыли подходы для пеших бригад. Именно в этих условиях в 2025 году компания «Геоскан» провела дистанционное обследование участка [3]. Полученный материал позволил определить базовые таксационные показатели насаждений и одновременно оформить проектную документацию, необходимую для перевода соответствующих лесовосстановительных земель в категорию участков со сформировавшимся древостоем.

Конкретная конфигурация решения начинается с состава бортовых сенсоров и камер. В типовом исполнении это оптика видимого диапазона и тепловизионный модуль. Разработки последнего поколения, однако, заметно расширяют эту базовую сборку.

Связка авиационного мониторинга с инструментами машинного обучения качественно меняет картину. Автоматическая обработка снимков и видеопотока с борта берёт на себя ту часть работы, которая прежде требовала многодневного выезда наземных бригад: теперь сопоставимый объём данных обрабатывается за часы.

Практическая ценность подобного подхода трудно переоценима: система позволяет с высокой точностью определять потенциальные очаги возгораний,

оценивать ущерб, нанесённый лесным массивам, с учётом отраслевых стандартов, а также отрабатывать множество других сценариев мониторинга. Временные затраты на обследование территорий сократились кардинально — процесс, занимавший недели, теперь укладывается в несколько часов.

Задачи, которые предстоит решать, а также условия их выполнения напрямую определяют как конструкцию самого БВС, так и состав бортового оборудования — на это обращает внимание Екатерина Лысун. Так, лазерные сканеры в связке с обычными и мультиспектральными фотокамерами позволяют получать детальные сведения о структуре и параметрах древостоев. Когда речь идёт о противопожарном мониторинге лесных массивов, дроны комплектуют тепловизионными и видеокамерами. В свою очередь, специалисты по лесной патологии используют аппараты, оснащённые мультиспектральными камерами.

Условия работы (доступность участка, сложность рельефа и т. д.) определяют тип беспилотника. Например, для участков, находящихся на значительном удалении от оператора, применяют БВС самолётного типа (VTOL). Они надёжны, способны находиться в воздухе длительное время и работать автономно. Это особенно важно в условиях Севера, Сибири и Дальнего Востока, где площадь лесного фонда велика, а дорожная сеть развита слабо [1].

Отдельного внимания заслуживают программные решения, создаваемые специально под нужды лесного хозяйства. В частности, компания «Геоскан» разработала бортовой ИИ-модуль, ориентированный на раннее выявление очагов возгорания в лесных массивах. Данная система не только помогает пилоту обрабатывать видеопоток с камер беспилотника, но и полностью берёт на себя эту функцию в режиме автономного полёта, когда аппарат работает вне зоны радиосвязи с наземным пунктом управления.

Применение беспилотных летательных аппаратов при инвентаризации молодых лесов и лесных культур открывает широкие возможности для детального анализа насаждений: технология позволяет с высокой степенью точности идентифицировать господствующие древесные породы, разграничить хвойный и лиственный ярусы, получить достоверные данные о высоте и занимаемой площади, а на основе собранной информации сформировать обоснованный проект рубок ухода, учитывающий актуальное лесоводственное состояние конкретного участка.

Устойчивость, качество и породный состав будущих лесных массивов в результате существенно улучшаются.

Воздушный лазерный сканер высокой точности (LiDAR) применяется нами для того, чтобы безошибочно установить координаты и высотные показатели каждого

отдельного дерева. Съёмка лесного фонда, как правило, производится посредством цифровых фотоаппаратов. На основе полученных данных, прошедших обработку в профессиональном программном обеспечении, формируются объёмные трёхмерные модели лесных территорий, а также рассчитывается матрица высот для спелых и перестойных древостоев.

Это позволяет средствами САПР и ГИС производить расчёт моделей ландшафта с аналитической классификацией поверхности. По полученной модели местности, включающей рельеф и объекты на ней, можно оценить перепад высот на определённой территории. Это помогает лесозаготовителю планировать размещение лесовозных дорог (в том числе зимников) в обход заболоченных участков.

References

1. Пархоменко Н. А., Алтухов А. А. Использование БПЛА в лесохозяйственных работах // Устойчивое развитие земельно-имущественного комплекса муниципального образования: землеустроительное, кадастровое и геодезическое сопровождение: сборник научных трудов по материалам III национальной научно-практической конференции (Омск, 24 ноября 2022 г.). Омск: Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, 2022. С. 49–54.
2. Петушкова В. Б., Потапова С. О. Мониторинг и охрана лесов с применением беспилотных летательных аппаратов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-i-ohrana-lesov-s-primeneniem-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата обращения: 21.05.2026).
3. Юнсон Э. В. Мониторинг лесного хозяйства с помощью беспилотных летательных систем // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 5 (143). DOI 10.60797/IRJ.2024.143.52

UDC 621.634

Kostyuk I.A., Krasnova M.N. Types of Abrasive Wear When Grinding Hard-to-Machine Metals

Виды износа абразивных материалов при шлифовании труднообрабатываемых
металлов

Kostyuk Ivan Aleksandrovich,

master

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Voronezh State Technical University»

Krasnova Marina Nikolaevna

PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Voronezh State Technical University»

Костюк Иван Александрович,
магистр

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Воронежский государственный технический университет»

Краснова Марина Николаевна

к. т. н, доцент кафедры технологии машиностроения Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский
государственный технический университет»

***Abstract.** The paper presents studies of diffusion, chemical, adhesive, and mechanical processes occurring in the tool-workpiece contact zone during grinding.*

***Keywords:** abrasive grains, adhesive wear, titanium grinding, coolant, quality and accuracy characteristics.*

***Аннотация.** В работе представлены исследования диффузионных, химических, адгезионных и механических процессов, протекающих в зоне контакта инструмент-деталь при шлифовании.*

***Ключевые слова:** абразивные зерна, адгезионный износ, шлифование титана, СОЖ, качественно-точностные характеристики.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Шлифование является одним из важнейших процессов в современном машиностроении, поскольку позволяет создавать детали с высокой точностью и безупречным качеством поверхности. Постоянное развитие технологий делает этот метод обработки всё более производительным и универсальным, что расширяет его применение для самых разных отраслей производства.

Как отмечает А.С. Янющкин, на долю шлифования приходится значительная часть всех операций механической обработки материалов [3]. Однако существенным недостатком этого процесса является интенсивное выделение тепла, которое может

негативно сказываться на качестве поверхностного слоя деталей. Чтобы решить эту проблему, ведутся активные научно-исследовательские работы по разным направлениям. Их цель – найти способы снижения тепловых нагрузок, что позволит расширить безопасные режимы резания, увеличить производительность труда и улучшить качество готовых изделий.

Сфера применения и разнообразие используемых металлов постоянно растут. Переходные металлы, благодаря своим уникальным свойствам, стали незаменимы в таких отраслях, как авиация, ракетостроение, космонавтика, энергетика, радиоэлектроника, химическая промышленность, машиностроение, металлургия, медицина и производство бытовой техники.

Однако, несмотря на широкое распространение, процессы их шлифования – финальной стадии обработки, определяющей окончательные свойства поверхности детали, – остаются недостаточно изученными. Этот пробел в знаниях серьёзно тормозит внедрение в производство новых конструкционных материалов.

Кроме того, важную роль в износе шлифовального инструмента играют химические реакции. Они активно протекают непосредственно в зоне контакта между абразивом, обрабатываемым материалом и окружающей средой. Риск возникновения таких реакций особенно велик при обработке химически активных металлов, к которым относится, например, титан. Это приводит к ускоренному разрушению инструмента и усложняет процесс обработки.

Теоретические положения базируются на научных положениях и законах физики, химии, химической термодинамики, физико-химической механики материалов, теории трения и износа материалов, теории резания. А.А. Волковский отмечает, что качество шлифованной поверхности оцениваются по результатам испытаний на долговечность специальных образцов и реальных деталей, остаточным напряжениям первого рода, микротвердости и шероховатости поверхности [1].

Изначально процесс шлифования металлов рассматривался исключительно как механическое воздействие. Исходя из этого подхода, при выборе абразивного инструмента руководствовались простым правилом: для обработки вязких (пластичных) металлов следует использовать более вязкие абразивные материалы, а для хрупких – соответственно, хрупкие. В рамках этой теории основными механизмами износа абразивных зёрен считались следующие: истирание (постепенное истирание вершины зерна, что приводило к образованию плоской площадки на его вершине и изменению шероховатости); расщепление (отделение от зерна небольших фрагментов); разрушение (откалывание крупных частиц, соизмеримых с размером самого зерна); вырывание (полное выпадение целого зерна из связки инструмента).

С появлением новых марок высоколегированных сталей, титановых, кобальтовых и молибденовых сплавов существующих представлений о механизме изнашивания стало недостаточно. На основании многочисленных исследований изнашивания абразивных материалов при микроцарапании и шлифовании различных металлов Т.Н. Лоладзе и Г.В. Бокучава выделяют три вида износа: адгезионно-усталостный, абразивный и диффузионный [2]. Адгезионный износ возникает из-за «схватывания» или прилипания материалов зерна и детали в точках контакта. При скольжении на поверхности зерна образуются и тут же срезаются так называемые адгезионные пятна. Многократное повторение этого процесса приводит к усталостному разрушению рабочей поверхности абразива. Это самый распространённый вид износа, интенсивность которого зависит от того, насколько сильно материалы сцепляются друг с другом и какую прочность имеют их контактные слои. Такой тип износа характерен, например, для шлифования титана кругами из карбида кремния и электрокорунда. Абразивный износ происходит, когда твёрдые частицы (включения) в обрабатываемом металле действуют как микрорезцы, царапая поверхность абразивного зерна. Интенсивность этого процесса напрямую связана с температурой: при нагреве твердость абразива падает. Поэтому на низких скоростях такой износ маловероятен, но с увеличением скорости резания температура абразива растёт быстрее, чем у металла. В результате твердость металлических включений может сравняться или даже превысить твердость затупившегося зерна, что и вызывает появление царапин на его задней поверхности. Диффузионный износ представляет собой процесс растворения материала абразивного зерна в обрабатываемом металле. Этот механизм активируется под воздействием трёх ключевых факторов: химического сродства между материалами, очень высоких температур в зоне резания и контакта чистых, ювенильных поверхностей.

Обработка титана и его сплавов шлифованием – сложная технологическая задача, обусловленная уникальными свойствами этого металла: низкой способностью проводить тепло, высокой вязкостью и сильной склонностью к налипанию. Для эффективного решения этой проблемы требуется комплексный подход.

Ключевые трудности при обработке:

- интенсивное тепловыделение: из-за высокого трения в зоне резания выделяется много тепла, которое плохо отводится от зоны обработки. Это приводит к катастрофически быстрому износу абразивного инструмента;

- повреждение поверхности: перегрев вызывает появление микротрещин и других дефектов в поверхностном слое детали;

- адгезионный износ: частицы титана легко налипают (привариваются) на рабочую поверхность инструмента, что снижает его эффективность и качество обработки.

Для успешного шлифования необходимо тщательно контролировать три основных аспекта: выбор абразивного инструмента (тип абразива должен соответствовать свойствам титана и требованиям к чистоте поверхности); режимы резания (к ним относятся скорость вращения круга, величина подачи и глубина съёма материала); система охлаждения (применение качественных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) является критически важным для интенсивного отвода тепла и предотвращения перегрева как детали, так и инструмента).

Достижение заданной шероховатости поверхности — важнейший этап финишной обработки, поскольку этот параметр напрямую влияет на долговечность изделия, прочность соединений и общие эксплуатационные характеристики материала. На формирование шероховатости при шлифовании влияют следующие основные факторы: (далее следует перечисление этих факторов).

Факторы, определяющие шероховатость:

1. Абразивный инструмент.
2. Зернистость круга (рис. 1). Чем мельче зерно абразивного инструмента, тем ниже шероховатость обработанной поверхности. Однако мелкое зерно увеличивает риск засаливания круга и снижает производительность процесса.

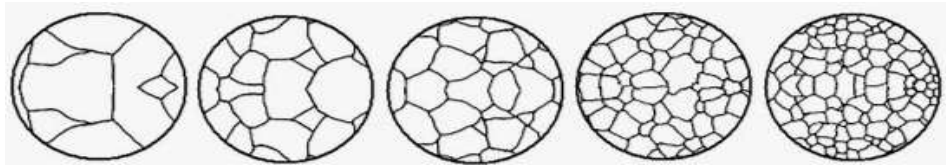


Рисунок 1. Зернистость круга

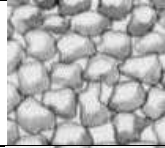

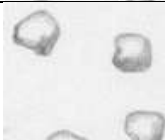
3. Связка. Прочность связки влияет на стойкость зерен, стабильность режущих кромок и, соответственно, на равномерность снятия материала.

4. Структура круга. Плотность расположения зерен также важна. Менее плотная структура позволяет лучше отводить стружку и охлаждать зону резания, снижая вероятность образования дефектов поверхности.

Структура абразивных инструментов, соотношение между объемами зерен и пор, представлена в таблице 1:

Таблица 1

Структура абразивных инструментов

Наименование	Внешний вид	Использование
Плотная		Для наружного круглого шлифования
Средняя		Для внутреннего круглого шлифования
Открытая		Для плоского шлифования и отрезания

Нормальный электрокорунд (Э) содержит 91 – 96% кристаллической окиси алюминия Al_2O_3 ; выпускается пяти марок – Э5, Э4, Э3, Э2К, Э2 (в марке Э5 – 95% Al_2O_3 , в марке Э4 – 94%] Al_2O_3 и т.д.).

Белый электрокорунд (ЭБ) изготавливается из чистого глинозема и содержит 97-99% Al_2O_3 . Имеет более высокие, чем электрокорунд Э, режущие свойства. Выпускается трех марок – Э9, Э9А и Э8, электрокорунд Э9А более качественен, чем Э9, и применяется для абразивного инструмента класса А. Электрокорунды Э и ЭБ применяют при обработке металлов и сплавов с высоким пределом прочности на разрыв (стали, ковкий чугун, мягкие бронзы).

Карбид кремния (карборунд) является химическим соединением кремния и углерода (SiC). Он получается из кварцевого песка при сплавлении его с углеродом (коксовым порошком). При нагреве в электропечах до $1920^\circ C$ кремнезем, содержащийся в кварцевом песке, вступает во взаимодействие с углеродом, образуя при этом карбид кремния. Карбид кремния имеет высокие твердость (уступая карбиду бора, алмазу и эльбору), теплоустойчивость (до $2050^\circ C$) и режущие свойства. Последнее объясняется тем, что при дроблении карбида кремния образуются острые режущие кромки. Карбид кремния выпускается двух видов: черный КЧ и зеленый КЗ; черный карбид кремния – КЧ8 (SiC – 98%) и КЧ7, зеленый карбид кремния – КЗ9 (SiC – 98,5%) и КЗ8 (SiC – 98%).

Черный карбид кремния менее качественен, чем зеленый. Зеленый карбид кремния имеет несколько большую твердость (HV до 3600 кгс/мм^2) и обеспечивает большую производительность (что объясняется его более острыми режущими кромками). При его изготовлении применяется чистый кварцевый песок (с содержанием

кремния выше 99%), более чистый углерод и затрачивается значительно больше электроэнергии; зеленый карбид кремния дороже черного. Карбид кремния хрупок. Поэтому его применяют при обработке материалов с малым пределом прочности на разрыв (чугуна, бронзовых и алюминиевых отливок, твердых сплавов и др.), причем зеленый карбид кремния используют в основном при заточке инструмента, оснащенного твердым сплавом. Карбид кремния применяют также и для безалмазной правки шлифовальных кругов после их затупления в процессе шлифования.

Карбид бора (B_4C) является химическим соединением бора с углеродом. Он обладает большой твердостью, приближающейся к самому твердому материалу – алмазу, но хрупок. Карбид бора применяют для доводки твердых сплавов, при притирочных работах, требующих применения режущего инструмента высокой твердости.

Для того чтобы скрепить отдельные абразивные зёрна в единый инструмент, используются специальные связующие вещества, или связки. Именно от их качества зависит, насколько прочно зерно держится в круге и какую общую прочность имеет сам шлифовальный круг, ведь при вращении на него действуют огромные центробежные силы.

Все связки делятся на две большие группы: органические и неорганические. К органическим относятся вулканитовая (В), бакелитовая (Б) и глифталевая (ГФ). Вулканитовая связка (существуют маркировки В1, В2, В3) состоит из каучука (резины) и серы (около 30%). Её получают путём смешивания размягчённой в бензине резины с порошком серы. Инструмент на такой основе отличается высокой прочностью, эластичностью и влагостойкостью. Благодаря сочетанию прочности и гибкости можно изготавливать очень тонкие инструменты – толщиной всего 0,5 мм при диаметре до 150 мм, что критически важно для некоторых видов работ. Кроме того, такие круги выдерживают высокие окружные скорости вращения (до 75 м/с) и обеспечивают отличное качество полировки поверхности. Главным недостатком вулканитовой связки является её склонность к быстрому засаливанию, когда поры инструмента забиваются металлической пылью и частицами абразива, что со временем снижает его режущую способность и производительность.

Бакелитовая связка (Б1, Б2), изготовленная из искусственной смолы (бакелита), получаемой из карболовой кислоты и формалина, придаёт шлифовальным кругам прочность, эластичность и позволяет работать на высоких скоростях вращения. Однако у неё есть существенный недостаток: она разрушается под воздействием щелочных охлаждающих жидкостей. Чтобы этого избежать, инструмент рекомендуется пропитывать парафином. Кроме того, бакелит теряет свою прочность при нагреве свыше 180 °С. Для

достижения более гладкой, менее шероховатой поверхности в состав такой связки иногда добавляют графитовый наполнитель.

Глифталевая связка, представляющая собой синтетическую смолу из глицерина и фталевого ангидрида, используется для производства инструмента, предназначенного для финишных операций – доводки и полировки.

К неорганическим связкам относятся керамическая (К), магнизиальная (М) и силикатная (С). Самой распространённой является керамическая связка (КО, К1, К3). Её изготавливают из огнеупорной глины, полевого шпата, кварца, а также талька, мела и жидкого стекла. Этот тип связки обладает высокой огнеупорностью и химической стойкостью. Инструменты на её основе отличаются большой производительностью, хорошо сохраняют форму рабочей кромки и не боятся влаги. Главным недостатком керамической связки является её хрупкость, из-за чего инструменты чувствительны к ударам и могут разрушаться при падении или неравномерной нагрузке.

Высокая скорость обеспечивает лучшее снятие металла, однако требует повышенного внимания к качеству охлаждения и стабильности процесса.

Применение смазочно-охлаждающих технологических средств является одним из важнейших факторов, позволяющих резко повысить эффективность шлифования. Путем совершенствования составов, технологий и техники применения СОТС можно существенно увеличить наработку абразивного инструмента, обеспечить требуемое качество шлифованных поверхностей деталей за более короткое время.

Расход смазочно-охлаждающей жидкости при шлифовании зависит от окружной скорости шлифовального круга и косвенно от зернистости. Это означает, что с увеличением скорости круга полезный расход СОЖ возрастает, так как повышается поток жидкости, проходящий в минимальный зазор между кругом и заготовкой (рис. 2).

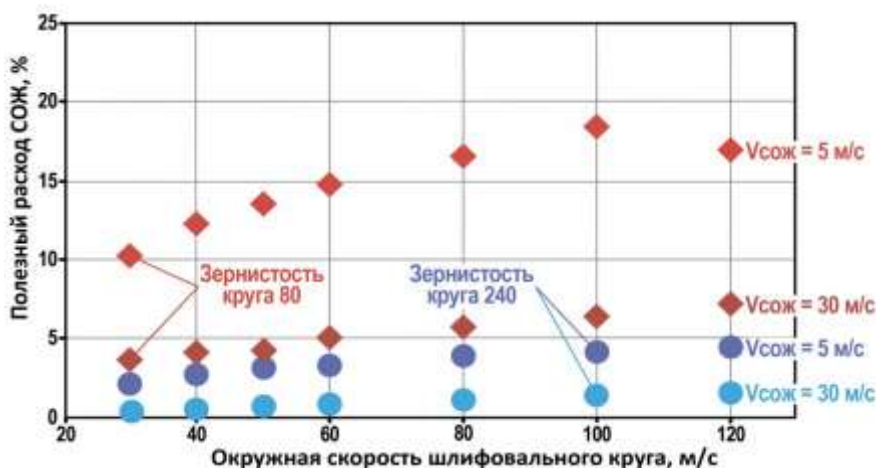


Рисунок 2. Зависимость полезного расхода СОЖ от окружной скорости шлифовального круга

Экспериментальные исследования показывают нелинейную зависимость температуры в шлифовальной дуге от расхода СОЖ. Можно выделить три основных диапазона: низкий (менее 20 л/мин), оптимальный (20-32 л/мин) и избыточный расход (32-40 л/мин) (рис. 3).

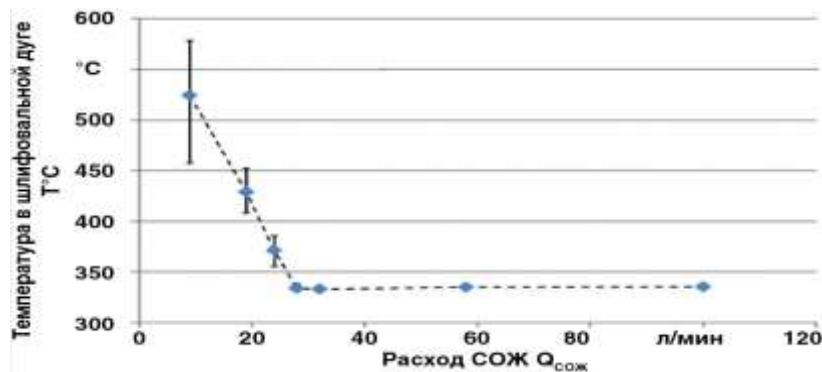


Рисунок 3. Зависимость температуры в шлифовальной дуге в зависимости от расхода СОЖ

Избыточное давление может привести к деформации детали, образованию прижогов и увеличению высоты микронеровностей.

Шероховатость определяется комплексом факторов, включая режимы шлифования и время обработки, оно может хоть и косвенно влиять через накопление износа инструмента, изменение температуры в зоне обработки и другие динамические процессы (рис. 4).

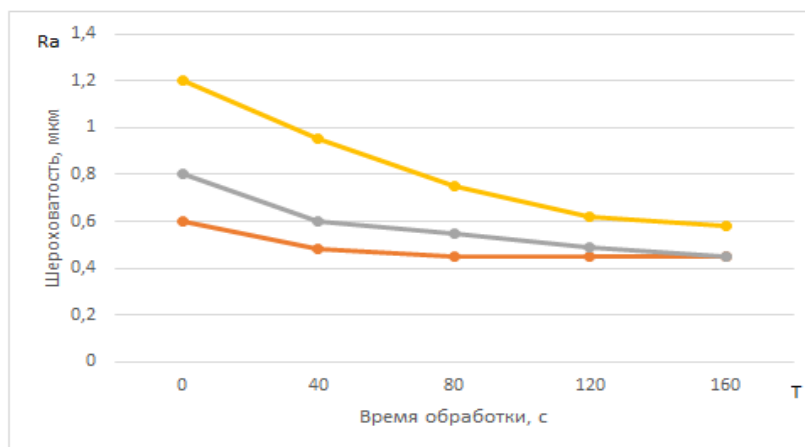


Рисунок 4. Зависимость шероховатости поверхности от времени обработки при различной исходной шероховатости

Применение контрольно-измерительных приборов, таких как профилометры, образцы шероховатости и щуповые датчики, для определения параметров шероховатости поверхности.

В связи с тем, что при увеличении глубины резания увеличивается объём снимаемого материала, усиливается трение и теплообразование (рис. 5). Таким образом, обеспечение необходимой шероховатости достигается комплексным подходом, включающим правильный выбор инструмента, оптимизацию времени и режима обработки, контроль температуры и учет особенностей материала заготовки.

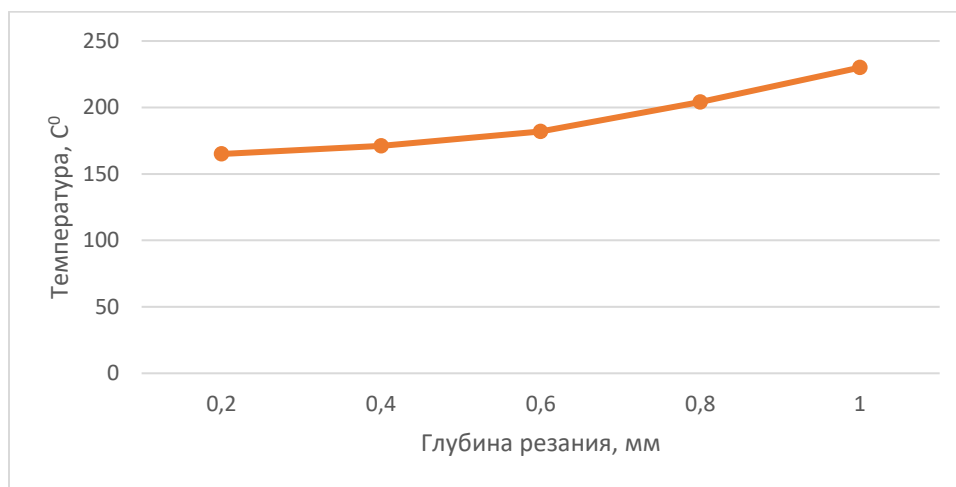


Рисунок 5. Зависимость температуры от глубины резания

Обеспечение качественных и точностных характеристик изделий при шлифовании включает комплекс мероприятий, направленных на достижение требуемого уровня точности размеров, формы и качества поверхности деталей.

Необходимо минимизировать возникновение дефектов обработки, таких как: шероховатость поверхности, задиры и царапины, деформации и напряжения в материале.

Рекомендации по повышению качества обработки.

Регулярная правка кругов для поддержания остроты режущих кромок.

Оптимизация режимов резания согласно характеристикам материала и требованиям чертежа.

Периодический контроль состояния оборудования и инструментов.

Таким образом, обеспечение высококачественных результатов при шлифовании требует комплексного подхода, включающего грамотный выбор инструмента, оптимизацию условий обработки и применение передовых методов контроля и диагностики.

References

1. Волковский А.А. Оценка качества обработанной поверхности при плоском шлифовании ПКМ / А.А. Волковский // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2023. – № 1. – С. 73-82.
2. Лоладзе, Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе. – Москва: Машиностроение, 1967. – 112 с.
3. Янюшкин А.С. Технология шлифования композиционных материалов / А.С. Янюшкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – № 1. – С. 449-451.

UDC 621.9.047

Krasnova M.N., Batin A.D. Analysis of methods, mechanical characteristics, structure and phase composition of iron-based alloys during surface hardening

Анализ методов, механических характеристик, структуры и фазового состава сплавов на основе железа при поверхностном упрочнении

Krasnova M.N.

PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology,
Voronezh State Technical University

Batin A.D.

Master's Student
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Voronezh State Technical University"

Краснова М.Н.

К. т. н, доцент кафедры технологии машиностроения
Воронежского государственного технического университета

Батин А.Д.

Магистрант

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет"

Abstract. *The study focuses on modern surface treatment methods for steels aimed at improving their mechanical properties and corrosion resistance. It explores various strengthening techniques, such as quenching, nitriding, plasma treatment, carburization, and pulse electron beam processing, highlighting the latest advancements in this field. The study examines the advantages and disadvantages of each method, as well as their impact on surface hardness and roughness. It presents research findings that demonstrate a significant increase in corrosion resistance and mechanical properties after pulse electron beam treatment. The paper also discusses the possibilities of using high-energy beams to modify the structure and improve the properties of various steels, including stainless and tool steels. The work highlights the potential of electron beam processing as a modern and effective method for enhancing the performance of steels.*

Keywords: *steels, surface treatment, microhardness, corrosion resistance, pulsed electron beam processing, hardening, mechanical properties, stainless steels, tool steels, additive technologies.*

Аннотация. *Исследование посвящено современным методам обработки поверхности сталей, направленным на улучшение их механических свойств и коррозионной стойкости. Рассматриваются методы упрочнения, такие как закалка, нитрация, плазменная обработка, карбидизация и импульсная электронно-пучковая обработка, с акцентом на последние достижения в этой области. Особое внимание уделяется преимуществам и недостаткам каждого метода, а также их влиянию на твердость и шероховатость поверхности. Рассматриваются результаты исследований, которые показывают значительное увеличение коррозионной стойкости и механических свойств материала после обработки импульсными электронными пучками. Также рассматриваются возможности применения высокоэнергетических пучков для модификации структуры и улучшения характеристик различных сталей, включая нержавеющие и инструментальные стали. Работа подчеркивает потенциал электронно-пучковой обработки как современного и эффективного метода для повышения эксплуатационных характеристик сталей в различных отраслях, таких как механическая, автомобильная и биомедицинская.*

Ключевые слова: *стали, обработка поверхности, микротвердость, коррозионная стойкость, импульсная электронно-пучковая обработка, упрочнение, механические свойства, нержавеющие стали, инструментальные стали, аддитивные технологии.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Сплавы на основе стали занимают ведущие позиции среди наиболее распространенных материалов, используемых в автомобилестроении, биомедицине, машиностроении и в подшипниковых системах. Для обеспечения надежной и долговечной работы этих конструкций, материалы, из которых они изготовлены, должны демонстрировать отличные механические свойства и химическую стойкость, даже в условиях агрессивной среды. Поэтому современное научное сообщество активно ищет новые и передовые технологии обработки поверхности сталей для их более широкого применения в сложных промышленных условиях. В последние десятилетия наблюдается рост интереса к исследованиям в области модификации поверхности сталей.

Например, исследования, проведенные Y. Fu [1], сосредоточены на поверхностном упрочнении стали 30CrMnSiA с помощью непрерывного электронного пучка. В его работе отмечается, что микротвердость обработанной поверхности увеличивается с 209 до 520 HV при этом уровень шероховатости не подвергается изменениям. Эти результаты подчеркивают высокую эффективность данного метода. Однако для более глубокого понимания его преимуществ необходимо рассмотреть и другие способы упрочнения поверхности сталей, а также провести их сравнительный анализ.

Методы упрочнения поверхности:

Закалка

Это процесс включает нагрев стали до высоких температур с последующим её быстрым охлаждением. Закалка увеличивает твердость и прочность, однако, может привести к возникновению внутренних напряжений.

Микротвердость: Обычно достигает 600-800 HV для некоторых сталей.

Шероховатость поверхности: Может увеличиваться в результате термической обработки.

Нитрация

Процесс, в котором на поверхность стали вводят азот для формирования нитридной пленки. Это приводит к увеличению твердости и улучшению износостойкости.

Микротвердость: Может достигать 1000 HV в зависимости от режима обработки.

Шероховатость поверхности: Как правило, остаётся на уровне, схожем с изначальным, но зависит от технологии.

Плазменная обработка

Использует плазменные источники для нанесения защитных покрытий на поверхность стали. Плазменная обработка позволяет создать покрытия высокой прочности и устойчивости к коррозии.

Микротвердость: Индексы твердости варьируются, но могут достигать до 1200 HV.

Шероховатость поверхности: Зависит от типа покрытия и условий нанесения, может быть улучшена или ухудшена.

Карбидизация

Процесс диффузии углерода в сталь, что приводит к образованию карбидов на поверхности. Этот метод значительно увеличивает износостойкость.

Микротвердость: Достигает 900-1100 HV в обработанных слоях.

Шероховатость поверхности: Опять же, зависит от условий обработки.

Импульсная электронно-пучковая обработка

Метод, при котором высокоэнергетический электронный пучок воздействует на поверхность материала, вызывая её быстрый нагрев и затем мгновенное охлаждение.

Микротвердость: Повышается с 208 HV до 520 HV, как показано в исследовании Y. Fu и соавт.

Шероховатость поверхности: Не изменяется, что является значительным преимуществом по сравнению с другими методами.

Сравнительный анализ характеристик методов упрочнения представлен в табл. 1.

Таблица 1.

Сравнительный анализ характеристик методов упрочнения

Метод упрочнения	Микротвердость (HV)	Шероховатость поверхности	Преимущества	Недостатки
Закалка	600–800	Может увеличиваться	Относительная простота обработки	Внутренние напряжения
Нитрация	~1000	Сохранение уровня	Высокая твердость и износостойкость	Длительность процесса
Плазменная обработка	До 1200	Зависит от технологии	Высокая прочность покрытия	Высокая стоимость оборудования
Карбидизация	900–1100	Зависит от условий	Устойчивость к износу	Изменение свойств основного материала
Импульсная электронно-пучковая обработка	500–900	Улучшение уровня	Минимальное изменение геометрии, глубокое упрочнение, отсутствие термических деформаций, применимость к различным материалам, быстрота процесса, экологичность	Стоимость оборудования

Импульсная электронно-пучковая обработка выделяется среди других методов обработки стали благодаря своей способности значительно увеличивать микротвердость при минимальных изменениях шероховатости поверхности. В то время как традиционные методы, такие как закалка, нитрация и карбидизация, успешно повышают твердость и износостойкость, они часто приводят к увеличению шероховатости, что может негативно сказаться на эксплуатационных характеристиках изделий.

Метод импульсной электронно-пучковой обработки обеспечивает эффект быстрого нагрева и последующего охлаждения, что позволяет минимизировать возникновение внутренних напряжений и сохранять высокое качество гладкости поверхности. Это делает данный метод особенно привлекательным для применения в условиях высокой нагрузки, где критически важны как твердость, так и чистота поверхности.

Таким образом, можно заключить, что импульсная электронно-пучковая обработка является наиболее оптимальным и эффективным методом для улучшения свойств стали, позволяя достичь высокого уровня твердости без ущерба для качества поверхности.

Работа ученых под руководством J. Kim [2] показала, что нанотвердость стали КР1 увеличилась на 315%, в то время как для стали КР4 этот показатель возрос на 145%. Это улучшение связано с ростом плотности линейных дефектов (дислокаций) в слое, обработанном импульсным электронным пучком (рис. 1).

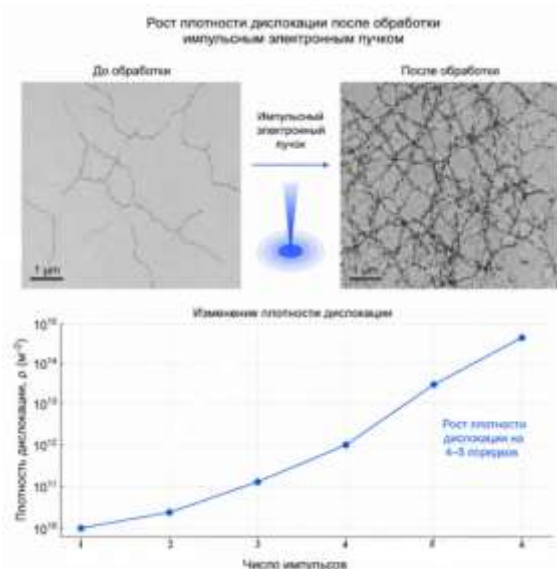


Рисунок 1 – Рост плотности дислокаций после обработки импульсным электронным пучком.

Известно, что коррозионная стойкость нержавеющей сталей в водных растворах относительно высока из-за оксидной пленки образуемой хромом, которая естественным образом образуется на поверхности материала. Однако хорошо известно, что нержавеющие стали подвержены точечной коррозии в хлоридсодержащих водных средах.

Этот недостаток объясняется наличием включений, таких фаз как Al-Mn и Mn-S (полностью аустенитная однофазная структура, свободная от ферритных δ - или σ -фаз) [3].

Аустенитная структура:

Стандартные нержавеющие стали, такие как 304 и 316, имеют аустенитную структуру с кубической гранецентрованной решеткой (FCC). Эта однородная структура обеспечивает высокую коррозионную стойкость, однако, ферритные или другие фазы могут образовываться под воздействием определенных условий, таких как температура или легирование.

Ферритная структура:

Хотя в данном контексте речь идет о полностью аустенитной стали, феррит может присутствовать в результате термической обработки или легирования. Например, сталь 430 — ферритная нержавеющая сталь, которая менее коррозионностойка в хлоридсодержащих средах.

Карбиды:

Наличие карбидов (например, карбиды хрома) в аустенитной структуре может приводить к образованию "локальных анодов", что способствует точечной коррозии. В стали 316L эти карбиды могут формироваться при высоких температурах сварки, что снижает коррозионную стойкость.

Супердуплексные стали:

Структура супердуплексных нержавеющей сталей (например, 2507) сочетает аустенитную и ферритную фазы. Это придает им отличные механические свойства и коррозионную стойкость, при этом они менее подвержены точечной коррозии, чем обычные аустенитные стали.

Интерметаллические фазы:

Включения, такие как Al-Mn или Mn-S, могут способствовать образованию интерметаллических фаз, которые из-за различий в электрохимической активности становятся активными центрами для точечной коррозии.

Эти структуры и фазы играют важную роль в коррозионной стойкости нержавеющей сталей, особенно в агрессивных средах, таких как морская вода или

хлоридсодержащие растворы. Понимание их образования и поведения помогает разработать более устойчивые к коррозии материалы.

Для улучшения механических свойств и химической стабильности поверхности сталей используются методы обработки с применением высокоэнергетических пучков [4]. Установлено, что облучение импульсными электронными пучками значительно повышает как механические, так и химические характеристики поверхности материалов [5]. Например, ученые под руководством Y. Fu предложили метод повышения коррозионной стойкости стали AISI 1045, который заключается в обработке поверхности псевдоискровым электронным пучком. Этот метод представляет собой разновидность циклической обработки импульсным электронным пучком и характеризуется быстрыми и повторяемыми операциями, что обеспечивает мгновенный выброс энергии и плазменное гашение. В результате такой обработки поверхности материала удастся достичь уникальных механических и структурных свойств. Исследования показали, что после обработки псевдоискровым электронным пучком в поверхностных слоях стали AISI 1045 формируется аморфная структура. Визуализация структуры материала представлена на рис.2.

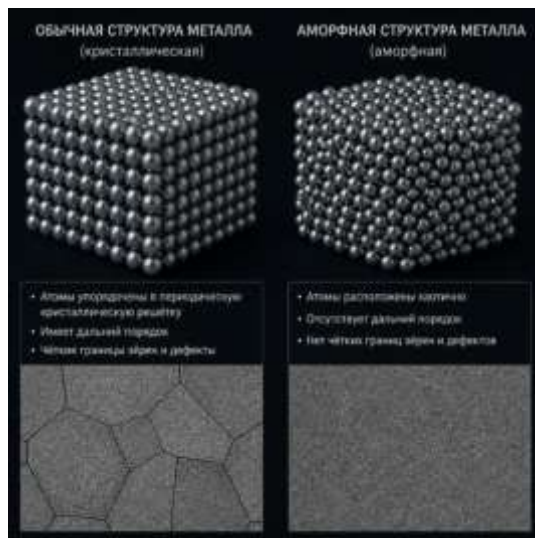


Рисунок 2 – визуализация структуры материала.

Обработанный слой имеет толщину в несколько микрон и обладает неоднородной структурой материала, в результате обработки происходит значительное уменьшение размеров зерен материала. Средний размер зерен в зоне воздействия меньше, чем в зоне плавления. Это объясняется комбинацией влияния температурно-индуцированных динамических полей, вызываемых резким изменением температуры, что приводит к локальным изменениям состояния материала, и наиболее выраженного температурного

градиента, который возникает в местах, где скорость изменения температуры максимально высока. В результате в зоне плавления происходит частичное расплавление материала, за которым следует быстрое затвердевание материала, что способствует образованию новых меньших по размеру зерен по сравнению с зернами в зоне термического воздействия.

Для исследования коррозионного поведения образцов до и после электронно-лучевой обработки применялась электрохимическая импедансная спектроскопия (ЭИС) и анализ потенциальной поляризации. Схема электрохимической импедансной спектроскопии представлена на рис. 3.

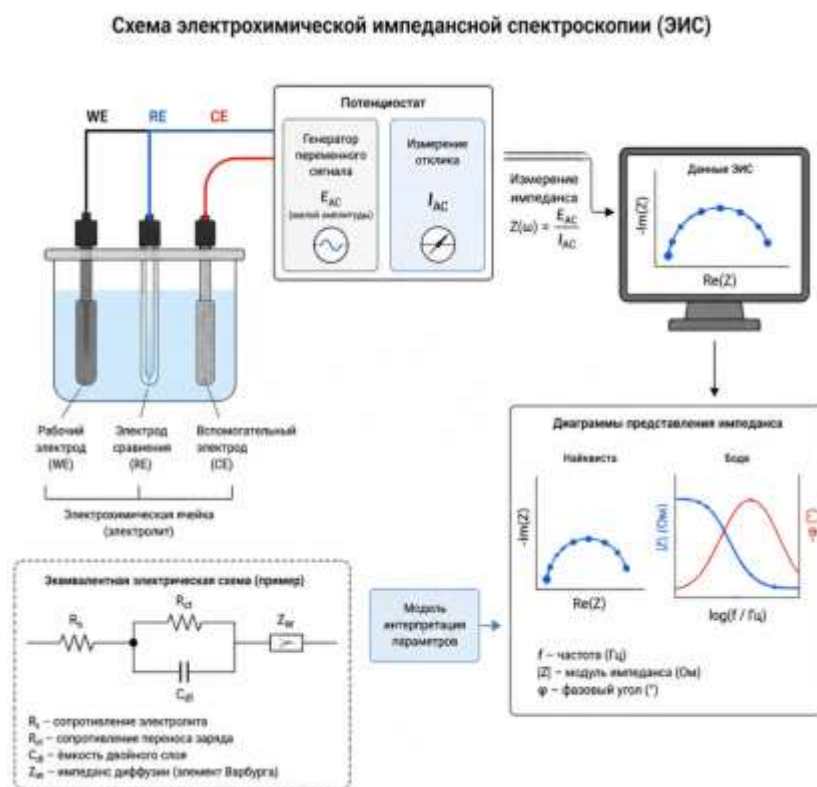


Рисунок 3 – Схема электрохимической импедансной спектроскопии.

Авторы установили, что увеличение коррозионной стойкости связано с комбинацией эффектов, таких как образования аустенита, удаления примесей в процессе электронно-лучевой обработки поверхности и формирование аморфной фазы, которая действует как однородная пассивная пленка. В работе [6] дуплексная нержавеющая сталь 2205 обработана сильноточным импульсным электронным пучком. Обнаружено, что такой вид обработки приводит к образованию кратеров на поверхности стальных материалов, где после 5 импульсов появляются трещины. Данное явление обусловлено растягивающими напряжениями возникающими в

модифицированном слое вследствие высокоскоростного охлаждения. Дальнейшие исследования показали, что повышение количества импульсов до 15 устраняло эту проблему. Микроструктурный анализ выполненный при помощи дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) и рентгеновской дифрактометрии показал, что содержание фазы α -Fe увеличивается в слое после обработки, что может быть связано с гомогенизацией поверхности. Схема микроструктурного анализа при помощи дифракции обратно рассеянных электронов представлена на рис. 4.

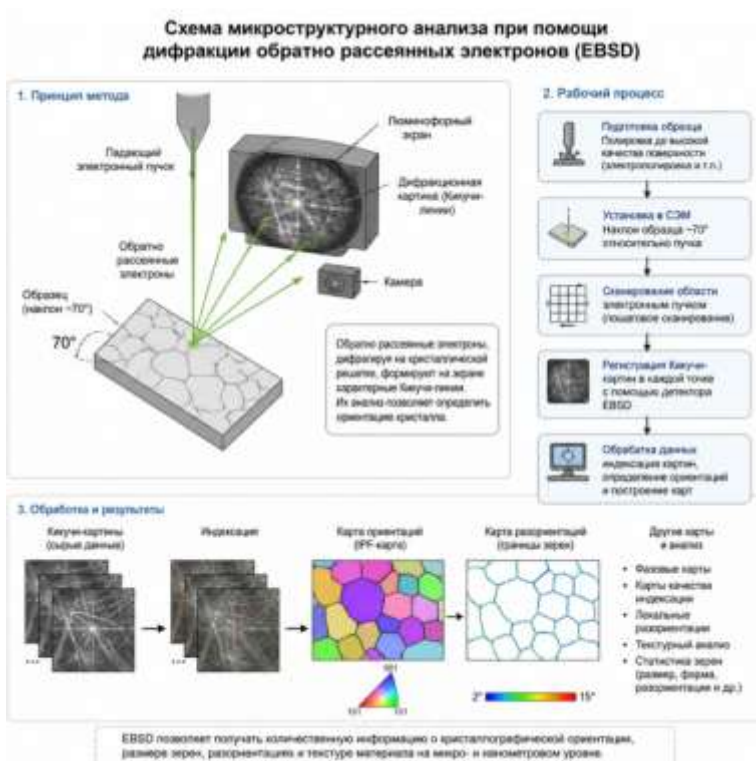


Рисунок 4 – Схема микроструктурного анализа при помощи дифракции обратно рассеянных электронов.

Кроме того, установлено увеличение микротвердости поверхности до значений 381 HV. Глубина упрочненного слоя увеличивалась с увеличением числа импульсов, достигая около 400 мкм. Коррозионные испытания в 3,4 мас.% водном растворе NaCl показали, что потенциал коррозии увеличился от -0,97 МВ для необработанного образца до -0,27 МВ для образца, обработанного высокоинтенсивными электронными пучками. График зависимости параметров от количества импульсов представлен на рис. 5.

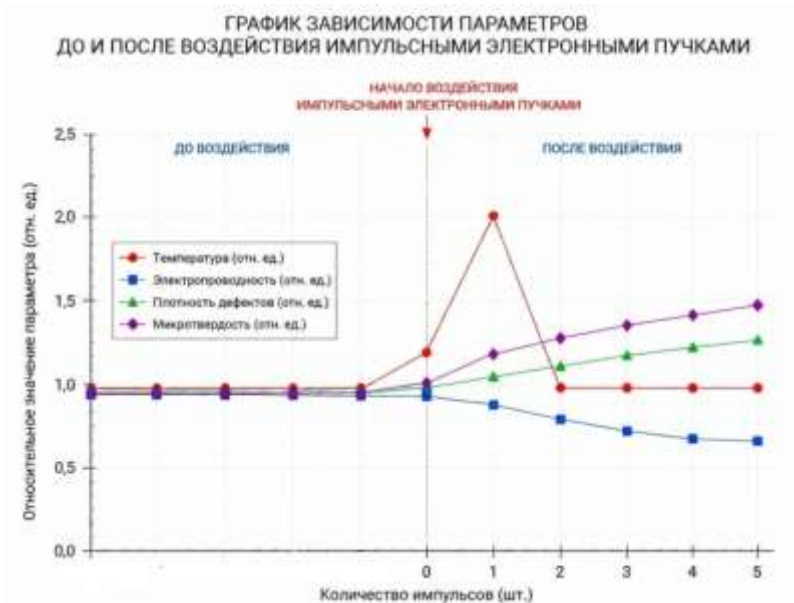


Рисунок 5 – График зависимости параметров от количества импульсов.

Еще одним примером увеличения коррозионной стойкости нержавеющей стали посредством обработки высокоэнергетическим электронным пучком может стать работа [7]. В ней показаны результаты коррозионных испытаний, и количественные значения износостойкости стали FV520B до и после обработки высокоэнергетическим импульсным электронным пучком. Параметры электронно-пучковой обработки были следующие: ускоряющее напряжение 26 кВ, длительность импульса 2,4 мкс и плотность энергии пучка 5 Дж/см². Металлографический анализ обработанных образцов показал, что с увеличением количества импульсов обработки микроструктура поверхности становится более однородной со средним размером зерна менее 3 мкм, схема представлена на рис. 6.

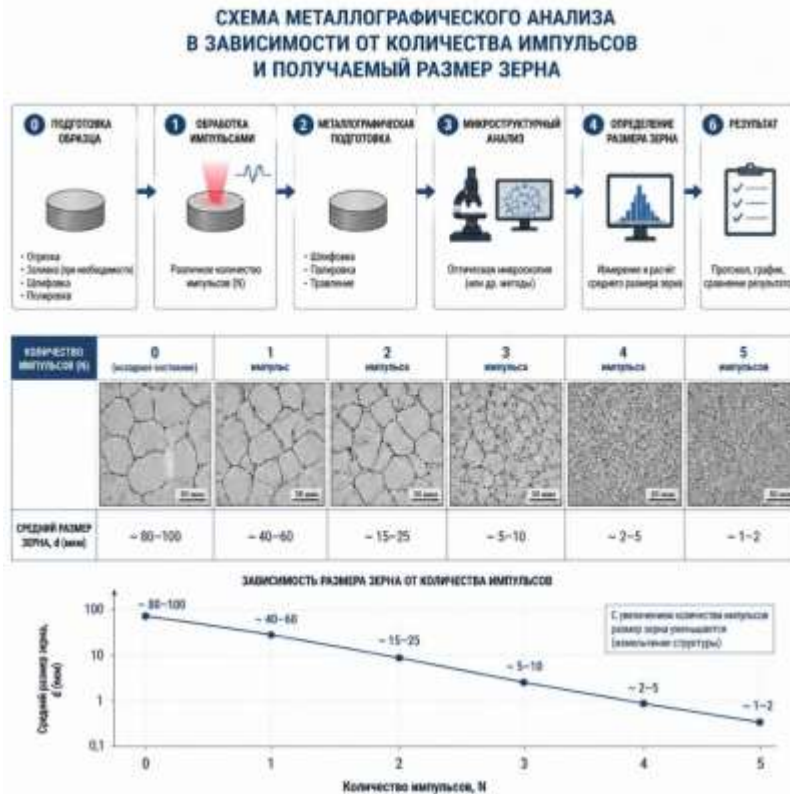


Рисунок 6 – Схема металлографического анализа в зависимости от количества импульсов.

Переплавленный слой, подвергшийся воздействию импульсного электронного пучка, имел глубину примерно 3 мкм. Результаты коррозионных испытаний показывают, что после 20 импульсов обработки сильноточным электронным пучком потенциал коррозии повысился до 0,037 В с 0,214 В исходного образца, износостойкость увеличилась в три раза. Высокоуглеродистые стали Т10, являющиеся разновидностью инструментальных сталей, широко применяются в производстве пресформ. Однако такие негативные характеристики как плохая прокаливаемость и большая закалочная деформация, ограничивают возможность применения материала для изготовления деталей сложной формы, предназначенных для работы при высоких нагрузках. Поэтому активно исследуются методы поверхностной обработки, одним из которых стала обработка поверхности электронным пучком. В статье [8] исследуются изменения микроструктуры поверхности, микротвердости, глубины переплавленного слоя и зоны термического влияния, морфологии поверхности, шероховатости поверхности и износостойкости стали Т10 после обработки импульсным электронным пучком с различным значением тока пучка. Графическая зависимость влияния тока на свойства поверхности представлена на рис. 7.

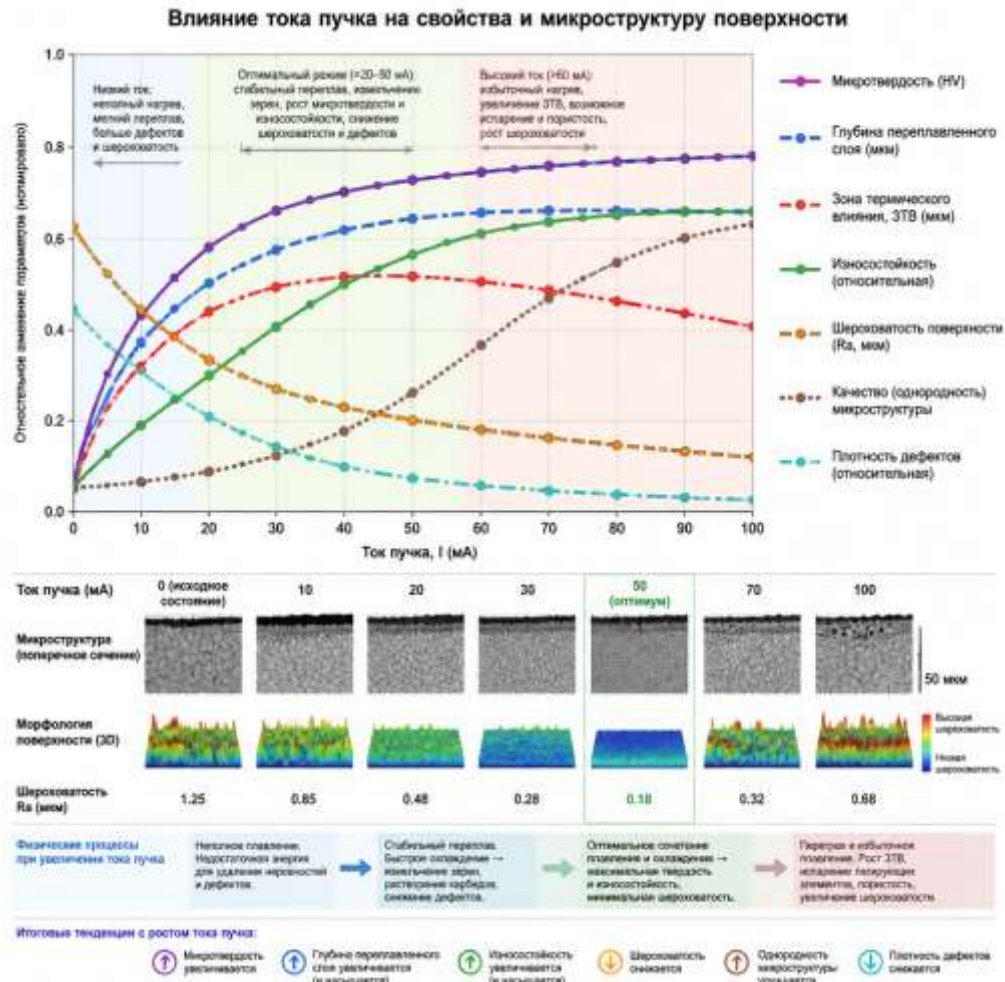


Рисунок 7 – Графическая зависимость влияния тока на свойства поверхности.

Представим зависимости: микротвердости, глубины переплавленного слоя, зоны термического влияния, шероховатости, износостойкости от изменения тока пучка.

Микротвердость:

Микротвердость HV может быть представлена как функция от тока:

$$HV = f(I)$$

где I — ток пучка.

Обычно увеличение тока приводит к увеличению микротвердости из-за более структурно-упорядоченного состояния материала.

Глубина переплавленного слоя:

Глубина переплавленного слоя d может зависеть от тока по следующей зависимости:

$$d = k \cdot I^n$$

где k и n — коэффициенты, зависящие от материала и режима обработки.

Зона термического влияния:

Зона термического влияния (ZTH) изменяется в зависимости от теплопередачи и распределения температуры, что также зависит от мощности пучка:

$$ZTH = C \cdot I_m$$

где C и m — материалозависимые коэффициенты.

Шероховатость поверхности:

Шероховатость Ra может быть представлена как функция от тока, где увеличение тока часто приводит к уменьшению шероховатости из-за лучшего плавления:

$$Ra = g(I)$$

Износостойкость:

Износостойкость может быть связана с микротвердостью и морфологией, представлена формулой:

$$W_{ear} = h(HV, Ra)$$

где увеличение микротвердости и уменьшение шероховатости, как правило, приводят к большей износостойкости.

Обработка металлов электронным пучком оказывает существенное влияние на микроструктуру стали, способствуя образованию игольчатого и реечного мартенсита в модифицированном слое. Увеличение тока пучка приводит к росту микротвердости поверхности и глубины модифицированного слоя. Например микротвердость поверхности образца составляет 839 HV, а глубина модифицированного слоя - 330 мкм при токе пучка 8 мА. Однако стоит отметить, что износостойкость поверхности стали Т10, снижается с увлечением тока пучка, и при значении тока 6 мА возникает минимальное трение и износ. Также с увеличением тока шероховатость поверхности уменьшается. Шероховатость поверхности составляет 0,47 мкм при токе 6 мА, это позволяет говорить, что электронно-лучевая обработка позволяет реализовать определенную степень полировки поверхности обрабатываемого изделия. В исследовании [9] была изучена структура и механические свойства инструментальной стали AISI S7 после двустадийной обработки, которая заключалась в обработке

поверхности электронным пучком и последующей криогенной заморозке что приводило к снижению остаточных растягивающих напряжений. Установлено, что после электронно-пучковой обработки в модифицированном слое формируется повышенное содержание остаточного аустенита, а последующая криогенная заморозка приводит к значительному уменьшению остаточного растягивающего напряжения модифицированного слоя, вероятно, из-за превращения остаточного аустенита в менее плотный мартенсит. Криогенная обработка превратила остаточный аустенит в мартенсит, и соответствующее расширение объема уменьшило пиковое остаточное напряжение растяжения на 28%, что делает данный метод перспективным для применения к инструментальным сталям. Сталь 40CrMn – представляющая собой конструкционную сталь со средним содержанием углерода, данный вид стали используется в промышленном производстве. В связи с этим ведутся исследования новых методов модификации поверхности стали для придания уникальных механических характеристик и продления срока службы различных изделий [10]. В исследовании [11] была проведена модификация поверхности стали 40CrMn методом непрерывного сканирующего электронного пучка. Металлографический анализ показал, что в модифицированном слое проходило мартенситное превращение, микроструктура представляла собой игольчатый и реечный мартенсит. На глубине 300 мкм микротвердость достигала максимума и составляла 741,3 HV. При токе пучка 4 мА глубина модифицированного слоя составляла 405,8 мкм, а при увеличении тока пучка глубина модифицированного слоя увеличивалась нелинейно. Установлено, что микротвердость поверхности увеличивается с увеличением тока пучка электронов. При токе пучка 6 мА микротвердость поверхности составила 693,8 HV. При скорости движения 110 мм/мин микротвердость поверхности составила 656,2 HV, что позволило авторам сделать вывод о том, что при увеличении скорости сканирования непрерывным электронным пучком микротвердость поверхности уменьшается. Обратный эффект наблюдается с шероховатостью поверхности стали, которая снижалась с увеличением скорости движения пучка электронов, при скорости 300 мм/мин, шероховатость поверхности уменьшилась с 1,7 до 0,8 мкм. Также были значительно улучшены параметры износостойкости поверхности стали 40CrMn после обработки электронным пучком [12].

По технологии непрерывного сканирования электронным пучком также была обработана поверхность литейной стали 5CrMnMo. Модификация поверхности стали 5CrMoMn непрерывным электронным пучком была проведена при следующих параметрах: скорость движения 60 мм/мин, ускоряющее напряжение 70 кВ, частота 310 Гц и ток пучка 6-8 мА. Металлографический анализ показал, что структура стали, после

обработки электронным пучком, состоит из расплавленного слоя, зоны термического влияния и матрицы подложки. Свойства поверхности, включая шероховатость поверхности, микротвердость поверхности и износостойкость, анализировали до и после обработки. Процесс быстрого охлаждения вызвал мартенситное фазовое превращение в модифицированном слое стали 5CrMnMo, и как следствие повышение характеристик твердости и износостойкости поверхностных слоев [13].

На сегодняшний день аддитивное производство демонстрирует быстрый темп роста. Эта технология, строящая изделия послойно, вызывает растущий интерес благодаря способности создавать компоненты сложной геометрии, которые трудно получить традиционными методами. Она предлагает такие значительные преимущества, как гибкость производства и экономия ценных материалов, однако, несмотря на уникальные свойства получаемых материалов, остаются и проблемы, включая микропоры и микротрещины в изделиях. Обработку готовых изделий после аддитивного производства импульсными электронными пучками рассматривают как жизнеспособный способ устранения дефектов.

В работе [14] исследуется постобработка импульсным электронным пучком мартенситной стали, полученной методами аддитивного изготовления. Результаты показали, что воздействие электронного пучка расплавляет поверхность изделия, заполняет трещины и пустоты, что ведет к образованию однородной поверхности. Преобладающей фазой в материале оказался объёмноцентрированный кубический α -мартенсит с небольшой долей гранецентрированной кубической γ -ферритной фазы аустенитной фазы. Также отмечено, что облучение пучком уменьшает шероховатость поверхности, что улучшает коррозионную стойкость материала.

В работе [15] изучались условия образования, структура и свойства слоёв на основе боридов железа на углеродистой стали 45 под воздействием электронного пучка в вакууме. Установлено, что после химикотермической обработки поверхностный слой состоит из FeB и борированного цементита. Применение защитного аморфного оксида способствовало достижению равновесного боридного слоя. В слоях наблюдались эвтектические структуры с микротвердостью в диапазоне 650–700 HV. Такой подход позволяет получить защитные покрытия, повышающие твёрдость и износостойкость деталей.

В работе [16] представлены результаты поверхностного упрочнения образцов из штамповой стали 5ХНМ методом комплексного насыщения бором и медью с последующей модификацией слоя электронно-пучковой обработкой на плазменном катоде. Целью исследования было повышение ряда физико-механических свойств боридных слоёв, в частности пластичности. Выполнен сравнительный анализ строения

диффузионного слоя после боромеднения и последующей модификации этим слоем электронно-пучковой обработкой. Проведён анализ морфологии диффузионного слоя, исследованы микротвердость, элементный и фазовый состав. Также оценена пластичность полученных диффузионных слоёв до и после обработки.

В настоящее время обработка различных материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками широко применяется для упрочнения их поверхностных слоёв [17]. Воздействие электронных пучков позволяет повысить эксплуатационные характеристики материалов, в частности микротвердость и износостойкость, а также модифицировать рельеф поверхности. Установлено, что быстрый нагрев и последующее rapid охлаждение материала при электронной обработке приводит к реструктуризации кристаллической зернистой структуры и снижению размера зерна [18]. Авторами [19] предложен способ поверхностного упрочнения головок стальных рельсов действующего рельсового пути (рис. 8), включающий нагрев по меньшей мере одной боковой или верхней поверхности головки рельсового пути электронными пучками, перемещающимися относительно рельса, и последующее охлаждение этой поверхности, отличающийся использованием низкоэнергетических электронов (100–300 кэВ), выводимых в воздушной атмосфере.

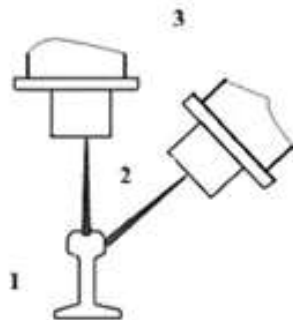


Рисунок 8. – Схема поверхности воздействия при упрочнении головок стальных рельсов: 1 – упрочняемая головка рельса ; 2 – импульсный электронный пучок ;
3 – выводной узел .

Этот способ позволяет быстро и эффективно осуществлять упрочнение головок одного или двух рельсов на относительно небольшую глубину (0,4-0,8 мм), при этом снижается вероятность отслаивания упрочненного слоя. Причем упрочнение рельсов с помощью предлагаемого метода можно проводить регулярно по мере износа упрочненного слоя.

В частности, предлагаемым способом поверхностного упрочнения электронными пучками рельсов, изготовленных из стали марки Р65, было достигнуто увеличение

твердости упрочненного слоя в 3 раза. Исходная твердость – 2300 МПа, твердость упрочненного слоя – 9000 МПа, толщина упрочненного слоя – 850 мкм. В процессе упрочнения происходит: высокоскоростной нагрев поверхности до температур выше точки аустенитизации (900-1500°C); распространение температурного фронта вглубь материала и протекание фазовых превращений α -фазы железа в γ - фазу, т.е. преобразование объемно-центрированных кристаллов в гранецентрированные; растворение углеродных и иных легирующих включений в гранецентрированных кристаллах γ -фазы железа, образование новых фаз; высокоскоростное остывание за счет теплопроводности внутрь головки рельса; формирование в упрочненном слое мартенситной структуры с высокой твердостью. Кроме того, данный способ позволяет существенно снизить весогабаритные характеристики оборудования для генерации и вывода электронного пучка. В частности, переход от электронного ускорителя с энергией электронов 1-4 МэВ к ускорителю с энергией 100-300 кэВ снижает характерные размеры оборудования в несколько раз и массу более чем в 15 раз. Данные количественные изменения носят уже качественный характер – появляется возможность установления подобного оборудования на любых рельсовых транспортных средствах и осуществления эффективного упрочнения рельсов непосредственно в составе действующих путей.

Вывод:

Исследование современных методов обработки поверхности сталей выявляет их ключевую роль в обеспечении повышенных механических свойств и коррозионной стойкости материалов, что делает эти технологии крайне актуальными для широкого применения в различных отраслях, таких как автомобилестроение, медицина и машиностроение. Импульсная электронно-пучковая обработка представляется наиболее перспективной благодаря своей способности значительно увеличивать микротвердость стали при минимальных изменениях шероховатости поверхности, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках изделий. Несмотря на ряд традиционных методов упрочнения, таких как закалка и нитрация, они часто сопровождаются нежелательными увеличениями шероховатости и внутренними напряжениями.

Проведенные исследования показывают, что применение высокоэнергетических электронных пучков приводит к улучшению не только механических свойств, но и коррозионной стойкости, что особенно важно в условиях агрессивных окружающих сред.

В контексте быстрого развития аддитивных технологий, обработка изделий, полученных с помощью этих методов, импульсными электронными пучками

представляет собой жизнеспособное решение для устранения дефектов и повышения качества конечных продуктов. Такой подход позволяет достигать однородной структуры материала и высокой коррозионной стойкости, что открывает новые горизонты для создания высококачественных и долговечных сталей, способных эффективно работать в условиях жесткой эксплуатации.

References

1. Surface hardening of 30CrMnSiA steel using continuous electron beam / Y. Fu, J. Hu, X. Shen [et al.]. – DOI 10.1016/j.nimb.2017.08.014 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2017. – Vol. 410. – P. 207–214. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.08.014> .
2. Kim, J. Corrosion inhibition and surface hardening of KP1 and KP4 mold steels using pulsed electron beam treatment / J. Kim, S. S. Park, H. W. Park. – 10.1016/j.corsci.2014.08.018 // Corrosion Science. – 2014. – Vol. 89. – P. 179–188. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.08.018> .
3. Chao, Q. On the enhanced corrosion resistance of a selective laser melted austenitic stainless steel / Q. Chao, V. Cruz, S. Thomas [et al.]. – DOI 10.1016/j.scriptamat.2017.07.037 // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 141. – P. 94–98. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.07.037> .
4. Исследование свойств системы цирконий (плёнка)/сталь 12X18H10T (подложка), подвергнутой импульсному электронно-пучковому воздействию / А. Д. Тересов, В. В. Шугуров, Ю. Ф. Иванов [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 9-3. – С. 145–149. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25225128> .
5. Структура и трибологические свойства поверхностного слоя, наплавленного на мартенситную сталь и модифицированного электроннопучковой обработкой / В. Е. Громов, В. Е. Кормышев, С. В. Коновалов [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т. 14, № 1. – С. 28–33. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28790847> .
6. Surface microstructure and property modifications in a duplex stainless steel induced by high current pulsed electron beam treatments / K. Zhang, J. Ma, J. Zou, Y. Liu. – DOI 10.1016/j.jallcom.2017.01.003 // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 707. – P. 178–183. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.003> .
7. Improving corrosion and wear resistance of FV520B steel by high current pulsed electron beam surface treatment / S. Hao, L. Zhao, Y. Zhang, H. Wang. – DOI 10.1016/j.nimb.2015.04.046 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section

B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2015. – Vol. 356–357. – P. 12–16. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.04.046> .

8. Effect of the continuous electron beam process treatment in the surface modification of T10 steel / R. Wang, H. Cui, J. Huang, H. Jiang. – DOI 10.1016/j.nimb.2018.09.004 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2020. – Vol. 436. – P. 29–34. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.09.004>

9. College, D. A. Alleviating surface tensile stress in e-beam treated tool steels by cryogenic treatment / D. A. College, Y. Zhu. – DOI 10.1016/j.msea.2018.03.036 // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 722. – P. 167–172. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.036> .

11. Ormanova, M. Electron beam surface treatment of tool steels / M. Ormanova, P. Petrov, D. Kovacheva. – DOI 10.1016/j.vacuum.2016.10.022 // Vacuum. – 2017. – Vol. 135. – P. 7–12. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.10.022> .

12. Surface microstructures and improved mechanical property of 40CrMn steel induced by continuous scanning electron beam process / R. Wang, J. Yu, D. Wei, C. Meng. – DOI 10.1016/j.nimb.2019.08.020 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2019. – Vol. 436. – P. 130–136. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.08.020> .

13. Surface modification of 5CrMnMo steel with continuous scanning electron beam process / D. Wei, X. Wang, R. Wang, H. Cui – DOI 10.1016/j.vacuum.2017.12.032 // Vacuum. – 2018. – Vol. 149. – P. 118–123. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.12.032> .

14. Enhancement of the surface properties of selective laser melted maraging steel by large pulsed electron-beam irradiation / T. S .N. Sankara Narayanan, J. Kim, H. E. Jeong, H. W. Park. – DOI 10.1016/j.addma.2020.101125 // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 33. – P. 101125. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101125> .

15. Дашеев, Д. Э. Математическое моделирование и особенности электронно-лучевого борирования низкоуглеродистых сталей в вакууме / Д. Э. Дашеев, А. П. Семенов, Н. Н. Смирнягина // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14, № 3. – С. 417–421.

16. Электронно-пучковая модификация боридных диффузионных слоев на поверхности штамповой стали 5ХНМ / С. А. Лысых, У. Л. Мишигдоржийн, Ю. П. Хараев [и др.]. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.028 // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 217–224. – URL: <https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest/article/view/529> .

17. Patent № 053407, DE, МПК В33У 10/00, В33У 30/00, В33У 40/00, H01J 37/30, H01J 37/304. Method for smoothing a component surface region : № PCT/EP2019/074525 : register 13.09.2019 : publication 19.03.2020 / B. Graffel, F. Winckler, S. Fritzsche [et al.] ; Fraunhofer

Gesellschaft zur Forderung der Angewandten Forschung eV. – 6 p. // Google.com: patents. – URL: <https://patents.google.com/patent/US20210197307A1/en> .

18. Patent № US10577684, МПК C22F 1/16, C22F 1/18, B23K 15/00, B33Y 10/00, C22C 14/00. Method for producing ultrafine-grained crystalline materials via electronbeam : № 15810895 : register 13.11.2017 : publication 03.03.2020 / R. D. Reeves, T. M. Lasko, J. J. Hill ; Mainstream Engineering Corp. – 13 p. // Google.com: patents. – URL: <https://patents.google.com/patent/US10577684B1/en> .

19. Патент № 2704051 Российская Федерация, МПК C21D 9/04. Способ и установка для поверхностного упрочнения головок стальных рельсов действующих путей : № 2018137161 : заявл. 23.10.2018 : опубл. 23.10.2019 / В. В. Кошлаков, Р. Н. Ризаханов ; заявитель Исследовательский центр имени М.В. Келдыша. – 14 с. // Yandex.ru: патенты. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2704051C1_20191023 .

UDC 533.6 (533.6.011)

Nguyen Van Lam, Nguyen Van Quang, Hoang Van Lam, Bui Van Hieu. The influence of the surface temperature factor on the minimum drag of axisymmetric power-law bodies in a free-molecular hypersonic flow

Влияние температурного фактора поверхности на минимальное сопротивление осесимметричных степенных тел в свободномолекулярном гиперзвуковом потоке

Nguyen Van Lam,
Ph.D. of Physics and Mathematics Sciences, Lecturer, Air Force Officer' College
Nguyen Van Quang,
Lecturer, Air Force Officers' College
Hoang Van Lam,
Lecturer, Air Force Officers' College
Bui Van Hieu,
Lecturer, Air Force Officers' College
Нгуен Ван Лам,
канд.ф.м. наук, преподаватель, Офицерское училище Военно-Воздушных Сил
Нгуен Ван Куанг,
преподаватель, Офицерское училище Военно-Воздушных Сил
Хоанг Ван Лам,
преподаватель, Офицерское училище Военно-Воздушных Сил
Буй Ван Хьеу,
преподаватель, Офицерское училище Военно-Воздушных Сил,

Abstract. *The problem of constructing bodies with minimum aerodynamic drag is one of the classical problems of hypersonic aerodynamics [1–5]. It is of particular interest under conditions of vehicle motion in a rarefied gas, where the hypothesis of local interaction between the flow and the body surface is applicable.*

Within this hypothesis, the variational problem reduces to the optimization of the body shape parameters [6].

In previously published studies on axisymmetric power-law bodies of minimum drag, the surface temperature factor appearing in the expressions for the pressure and friction coefficients was usually assumed to be constant, while the main attention was paid to the influence of geometric parameters, in particular the body elongation.

Meanwhile, the thermal state of the surface affects the parameters of local interaction and may change the solution of the drag minimization problem. However, its influence in free-molecular hypersonic rarefied gas flows has not yet been systematically investigated.

The aim of this study is to investigate the influence of the surface temperature factor on the solution of the drag minimization problem for axisymmetric power-law bodies in free-molecular hypersonic flow of a rarefied gas.

A numerical analysis was carried out for various values of the body elongation and the surface temperature factor. The results showed that the temperature factor has a negligible effect on the optimal exponent of the power-law generating curve, which approaches the limiting value $\beta = 3/2$ as the elongation increases.

The obtained results refine the understanding of the influence of the temperature factor on minimum drag in the free-molecular regime and complement classical solutions of Newton's problem.

Keywords: *Hypersonic flow, free molecular regime, power-law bodies of revolution, optimal shape, temperature factor, minimum drag.*

Аннотация. *Задача построения тел минимального аэродинамического сопротивления является одной из классических задач гиперзвуковой аэродинамики [1-5]. Особый интерес она представляет в условиях движения летательного аппаратов в разреженном газе, где применима гипотеза локального взаимодействия потока с поверхностью тела. В рамках этой гипотезы вариационная задача свести к задаче оптимизации параметров формы тела [6].*

В известных работах, по степенным осесимметричным телам минимального сопротивления температурный фактор поверхности t_w , входящий в выражения для коэффициентов давления и трения, как правило принимался постоянным, а основное внимание уделялось влиянию геометрических параметров, в частности удлинения тела. Между тем температурное состояние поверхности влияет на параметры локального взаимодействия и может изменять решение задачи минимизации сопротивления. Его влияние в свободномолекулярном гиперзвуковом потоке разреженного газа до настоящего времени систематически не исследовано.

Целью настоящей работы является исследование влияния температурного фактора на решение задачи минимизации сопротивления для осесимметричных степенных тел в свободномолекулярном гиперзвуковом потоке разреженного газа.

Проведён численный анализ для различных значений удлинений и температурного фактора поверхности. Показано, что температурный фактор практически не влияет на оптимальный показатель степени степенной образующей, который при больших удлинениях стремится к предельному значению $\beta = 3 / 2$.

Полученные результаты уточняют влияние температурного фактора на минимальное сопротивление в свободномолекулярном режиме и дополняют классические решения задачи Ньютона.

Ключевые слова: Гиперзвуковой поток, свободномолекулярный режим, степенные тела вращения, оптимальная форма, температурный фактор, минимальное сопротивление.

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Математическая модель

Рассматривается осесимметричное тело вращения длиной L_0 и радиусом основания R_0 . Образующая тела задаётся функцией $y(x)$ (с.м рис.1).

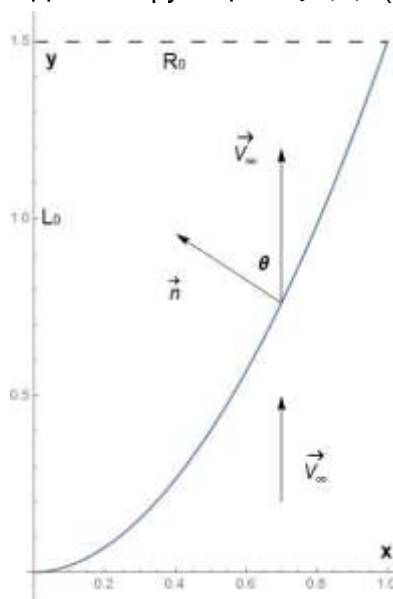


Рис. 1. Схема образующей тела.

Коэффициент сопротивления тела определяется выражением

$$C_x = \frac{2}{R_0^2} \int_0^{R_0} (c_p \cos \theta + c_\tau \sin \theta) x \sqrt{1 + (dy/dx)^2} dx \quad (1)$$

Здесь C_p и C_τ - коэффициенты давления и трения, действующие на элемент поверхности тела.

В свободномолекулярной модели гиперзвукового потока коэффициенты давления и трения имеют вид [7-10]

$$\begin{aligned} c_p &= 2 \cos^2 \theta + z \cos \theta \\ c_\tau &= 2 \cos \theta \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

Где, $z = \sqrt{\pi t_w (\gamma - 1) / \gamma}$, t_w - температурный фактор поверхности, γ - показатель адиабаты газа, θ - угол между внутренней нормалью к поверхности и направлением набегающего потока.

Рассмотрим степенную образующую $y = L_0 \left(\frac{x}{R_0} \right)^\beta$

Где β - показатель степени, определяющий форму тела. Введём удлинение тела $\lambda_0 = \frac{L_0}{R_0}$. Тогда, получаем выражение для коэффициента сопротивления имеет в виде [11]

$$C_x = 2 + 2z \int_0^1 \frac{x}{\sqrt{1 + (\lambda_0 \beta x^{\beta-1})^2}} dx \quad (3)$$

Минимальное значение коэффициента сопротивления (3) достигается при оптимальном значении параметра β для заданного удлинения тела λ_0 .

Численный анализ

Численные расчёты проводились для диапазона удлинений $\lambda_0 = 2 \div 30$ при различных значениях температурного фактора поверхности $t_w = 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0$

Для каждого значения удлинения λ_0 определялось оптимальное значение показателя степени β , при котором коэффициент сопротивления C_x принимает

минимальное значение.

В таблице 1 приведены значения оптимального показателя степени β при различных значениях температурного фактора t_w для заданного удлинения тела λ_0 .

Таблица 1

Оптимальное значение показателя степени β

λ_0	$\beta(t_w = 0.05)$	$\beta(t_w = 0.2)$	$\beta(t_w = 0.5)$	$\beta(t_w = 1.0)$
2	1.88956	1.88956	1.88956	1.88956
3	1.68154	1.68154	1.68154	1.68154
4	1.6067	1.6067	1.6067	1.6067
5	1.57111	1.5711	1.5711	1.57111
6	1.55117	1.55117	1.55117	1.55117
8	1.5305	1.5305	1.5305	1.5305
10	1.52042	1.5204	1.52042	1.5204
14	1.51111	1.5111	1.5111	1.51111
16	1.5087	1.5087	1.5087	1.5087
20	1.50579	1.50579	1.50579	1.50579
30	1.5027	1.5027	1.5027	1.5027

Из этой таблицы видно, что значения оптимального показателя степени β практически не зависят от температурного фактора поверхности. При увеличении удлинения тела λ_0 показатель степени β стремится к предельному значению $\beta \rightarrow 3/2$

На рис. 2 представлены зависимости минимального коэффициента сопротивления C_x от удлинения тела λ_0 при различных значениях температурного фактора t_w .

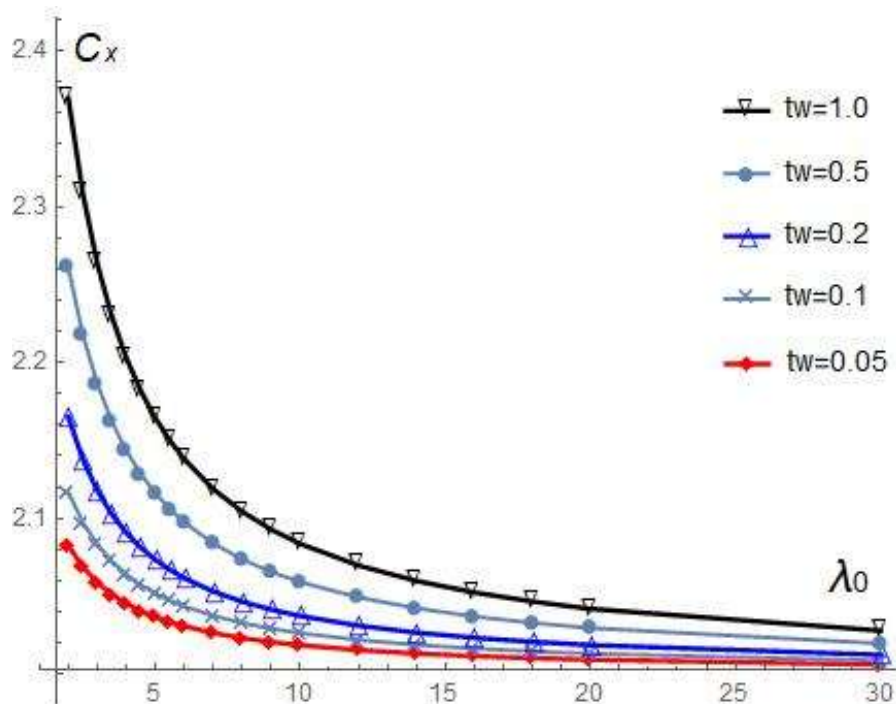


Рис. 2. Зависимости минимального коэффициента сопротивления C_x от удлинения тела λ_0 при различных значениях температурного фактора t_w .

Из рисунка 2 очевидно, что минимальное значение коэффициента сопротивления для осесимметричных степенных тел существенно зависит от температурного фактора поверхности t_w . При увеличении температурного фактора t_w минимальное значение коэффициента сопротивления C_x возрастает. Наибольшие различия между кривыми наблюдаются при малых значениях удлинения тела. По мере увеличения удлинения λ_0 различия между кривыми уменьшаются и значения минимального сопротивления стремятся к одному предельному значению.

Заключение

В данной работе исследовано влияние температурного фактора поверхности на минимальное сопротивление осесимметричных степенных тел вращения в свободномолекулярном гиперзвуковом потоке разреженного газа.

Показано, что оптимальный показатель степени β степенной образующей практически не зависит от температурного фактора поверхности и при увеличении удлинения тела показатель степени стремится к значению $\beta \rightarrow 3/2$. Это значение

совпадает с известным асимптотическим результатом для тел большого удлинения [11].

В то же время температурный фактор оказывает заметное влияние на величину минимального коэффициента сопротивления. При увеличении температурного фактора минимальное сопротивление возрастает. Наибольшее влияние наблюдается при малых значениях удлинения тела λ_0 .

Таким образом, температурное состояние поверхности влияет на величину аэродинамического сопротивления, однако практически не изменяет геометрию оптимальной формы тела.

Полученные зависимости могут быть использованы при оценке аэродинамических характеристик летательных аппаратов, движущихся в разреженных слоях атмосферы в гиперзвуковом режиме.

References

1. Миеле А. Теория оптимальных аэродинамических форм. М: Мир, 1969, 508 с.
2. Вышинский В.В., Кузнецов Е.Н. Исследование обтекания тел вращения с образующей Рябушинского // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. № 1. С. 33-35.
3. Вышинский В.В., Кузнецов Е.Н., Михайлов П.Д. Тела вращения с минимальным сопротивлением в трансзвуковом потоке газа // Ученые записки ЦАГИ. 1992. Т. XXIII, № 2, С. 78-81.
4. Мазуров А.П., Таковицкий С.А. Метод построения оптимальных контуров фюзеляжа и сопла летательных аппаратов на режиме крейсерского сверхзвукового полета // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. XLIV, № 3, С. 74-81.
5. Таковицкий С.А. Аналитическое решение задачи минимизации волнового сопротивления осесимметричной носовой части в рамках локальной линеаризации // ПММ. 2018. Т. 82. Вып.6. С. 775-782.
6. Горелов С. Л., Нгуен В. Л. Степенные тела минимального сопротивления и аэродинамическая задача Ньютона. // Труды МФТИ. 2023. Т. 15. № 3. С. 144-154.
7. Коган М.Н. Динамика разреженного газа. - М: Наука, 1967. - 440 с.
8. Кошмаров Ю.А., Рыжов Ю.А. Прикладная динамика разреженного газа. - М: Машиностроение, 1977. - 184 с.
9. Гусев В.Н., Ерофеев А.И., Климова Т.В., Перепухов В.А., Рябов В.В., Толстых А.И. Теоретические и экспериментальные исследования обтекания тел простой формы гиперзвуковым потоком разреженного газа // Труды ЦАГИ. 1977. Вып. 1855. С. 43.
10. Егоров И.В., Ерофеев А.И. Исследование гиперзвукового обтекания плоской пластины на основе сплошнородного и кинетического подходов // Ученые записки ЦАГИ. 1997. Т. XXVIII. № 2. С. 23 - 40.
11. Горелов С.Л., Нгуен Ван Лам. Тело вращения минимального аэродинамического сопротивления в гиперзвуковом потоке разреженного газа // Труды МАИ. 2020. № 113.

UDC 621.634

Spetsanov N.S., Krasnova M.N. The manufacturing process of bevel gears

Процесс изготовления конических шестерен

Spetsanov Nikita Sergeevich,

Master

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Voronezh State Technical University"

Krasnova Marina Nikolaevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering
Technology

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Voronezh State Technical University"

Спецанов Никита Сергеевич,
магистр

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Воронежский государственный
технический университет»

Краснова Марина Николаевна

к. т. н, доцент кафедры технологии
машиностроения Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Воронежский государственный
технический университет»

Abstract. *Bevel gear transmissions represent an essential element of modern mechanical engineering, ensuring torque transmission between intersecting or crossed shaft axes. The manufacturing technology of bevel gears includes a complex of operations from blank production to final finishing of the gear ring. Particular attention in the production process is paid to the accuracy of tooth surface formation, cutting methods and finishing operations. The article examines the main technological operations for manufacturing bevel gears with straight and circular teeth, including modern processing methods, requirements for equipment and tools, and quality assurance issues for finished products.*

Keywords: *bevel gear transmissions, gear cutting, tooth formation, gear cutting tools, cutter heads, machining accuracy, generating methods.*

Аннотация. *Конические зубчатые передачи являются неотъемлемым элементом современного машиностроения, обеспечивая передачу крутящего момента между пересекающимися или скрещающимися осями валов. Технология изготовления конических шестерен включает комплекс операций от получения заготовки до финишной обработки зубчатого венца. Особое внимание в производственном процессе уделяется точности формообразования боковых поверхностей зубьев, методам нарезания и отделочной обработки. В статье рассматриваются основные технологические операции изготовления конических шестерен с прямыми и круговыми зубьями, включая современные методы обработки, требования к оборудованию и инструменту, а также вопросы обеспечения качества готовых изделий.*

Ключевые слова: *конические зубчатые передачи, зубонарезание, формообразование зубьев, зуборезный инструмент, резцовые головки, точность обработки, методы обката.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Конические зубчатые передачи представляют собой механические устройства, передающие вращательное движение и крутящий момент между валами с пересекающимися или скрещивающимися осями. В отличие от цилиндрических передач, где оси валов параллельны, конические передачи работают преимущественно под углом 90°, хотя возможны и другие угловые конфигурации. Эта особенность определяет их широкое применение в приводах автомобилей, авиационной техники, станков и другого промышленного оборудования, где требуется изменение направления передачи мощности.

Производство конических шестерен представляет собой технологически сложный процесс, требующий высокоточного оборудования и специализированного инструмента. При этом геометрия конических передач – начиная с формы зубьев и заканчивая конусностью заготовки – существенно усложняет процесс механической обработки по сравнению с изготовлением цилиндрических колес. Особенности конструкции определяют необходимость применения специфических методов формообразования зубьев, что предъявляет повышенные требования к квалификации персонала и организации производственного процесса.

Анализ современных технологических подходов показывает, что качество конических передач определяется точностью геометрических параметров зубьев, характеристиками контактного пятна в зацеплении, шероховатостью рабочих поверхностей и физико-механическими свойствами материала. Совокупность этих факторов обуславливает необходимость комплексного подхода к проектированию технологического процесса изготовления конических шестерен.

Заготовительные операции и подготовка базовых поверхностей

Технологический процесс изготовления конических шестерен начинается с получения заготовки. В зависимости от размеров детали, требований к механическим свойствам и серийности производства применяются различные методы получения исходных заготовок. Для мелких и средних деталей в крупносерийном производстве наиболее распространена горячая объемная штамповка, обеспечивающая высокую производительность и экономию материала. При этом заготовка приобретает форму, приближенную к готовой детали, что сокращает объем последующей механической обработки.

В условиях единичного и мелкосерийного производства заготовки часто получают из проката путем отрезки и последующей токарной обработки. Для крупногабаритных конических колес применяют литье в песчаные формы или кокили,

обеспечивающее получение требуемых габаритных размеров при минимальных отходах металла.

Для сравнения данных методов получения заготовок приведу таблицу:

Метод	Преимущества	Недостатки	Применение
Отрезка от прутка	Простота, экономичность для малых деталей	Неэффективно для крупных заготовок	Малонагруженные шестерни до 50–60 мм
Штамповка	Сокращение припусков, сохранение структуры металла	Высокие требования к точности, часто нужна доработка	Крупные шестерни, где важна экономия металла
Литьё	Возможность сложных форм, экономия на начальной стадии для крупных партий	Низкая точность, риск дефектов	Крупные и сложные детали
Пластическое формообразование	Упрочнение металла, минимальный припуск	Требует специализированного оборудования	Перспективно для массового производства

Штамповка заготовок имеет ряд преимуществ: снижается расход металла из-за отсутствия облоя, форма заготовок ближе к готовой детали, экономия металла составляет от 10 до 30%.

После получения заготовки выполняется подготовка базовых поверхностей, которая включает черновую и получистовую токарную обработку. На этом этапе обрабатываются посадочное отверстие или поверхность вала, торцы детали, формируется наружный контур заготовки с припусками под последующие операции. Особое внимание уделяется точности базовых поверхностей – посадочного отверстия и торца, от которых зависит правильность установки заготовки при зубонарезании. Биение этих поверхностей не должно превышать 0,02–0,03 мм для колес средней точности. В процессе токарной обработки формируется также конусная поверхность заготовки под будущий зубчатый венец. Угол конуса должен соответствовать углу делительного конуса проектируемого колеса с учетом припуска на последующую обработку.

Режимы резания для токарной обработки подбираются по формуле самостоятельно. Примеры формул выглядят вот так:

Глубина резания (мм) Толщина срезаемого слоя за один проход, измеренна перпендикулярно обработанной поверхности:

$$t = \frac{D - d}{2}$$

где:

D — диаметр заготовки до обработки (мм);

d — диаметр после обработки (мм).

Скорость резания (мм/мин) Линейная скорость перемещения точки на поверхности заготовки относительно режущей кромки инструмента:

$$V = \frac{C_v \cdot K_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y}$$

:

C_v — табличный коэффициент скорости (зависит от пары «материал заготовки — материал инструмента»);

K_v — общий поправочный коэффициент ($K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{iv}$);

T — стойкость инструмента (мин, обычно 30–60 мин);

m, x, y — показатели степени (берутся из таблиц);

t — глубина резания (мм);

S — подача (мм/об).

Частота вращения шпинделя (n , об/мин) Рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}$$

где:

V - скорость резания (м/мин);

D -диаметр обрабатываемой поверхности (мм);

π - 3,1415926535

Для токарной обработки конических шестерен можно использовать большое разнообразие режущих пластин и державок. Для примера приведу наиболее подходящую пластину WNMG 080404.

Токарные пластины серии WNMG — это сменные твердосплавные пластины тригональной формы (80°) с нулевым задним углом. Они широко применяются для обработки стали, нержавеющей стали, чугуна и жаропрочных материалов. Такие пластины двусторонние, что позволяет использовать до 6 режущих кромок, что повышает экономичность инструмента.

Пример пластины WNMG 080404



Расшифровка маркировки:

- W — тригональная форма пластины (80°). cncmagazine.ru +1
- N — задний угол равен 0° (отрицательная геометрия). cncmagazine.ru +1
- M — класс точности (стандартный допуск от $\pm 0,08$ до $\pm 0,18$). cncmagazine.ru +1
- G — пластина с цилиндрическим отверстием и формованной передней поверхностью на одной стороне.
- 08 — размер вписанной окружности (IC) примерно 8 мм.
- 04 — толщина пластины 4,76 мм.
- 04 — радиус при вершине 0,4 мм

Особенности пластин WNMG:

- Устойчивость к ударным нагрузкам и вибрациям благодаря прочной твердосплавной основе.
- Долговечность при высоких температурах.
- Универсальность: подходят для черновой и чистовой обработки.

Методы нарезания зубьев конических колес

Основной и наиболее ответственной операцией в технологическом процессе изготовления конических шестерен является нарезание зубьев. Существует несколько принципиально различных методов формообразования зубчатого венца, выбор которых зависит от типа зубьев (прямые или круговые), требуемой точности, серийности производства и имеющегося оборудования.

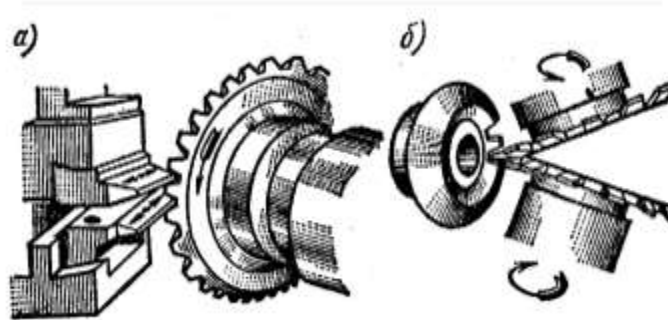
Таблица способов нарезания зубьев:

Метод	Описание	Применение	Особенности
Метод копирования	Профиль впадины зуба формируется инструментом, форма которого соответствует форме впадины нарезаемого колеса. После обработки одной впадины заготовка поворачивается на один зуб.	Дисковые и пальцевые модульные фрезы для цилиндрических колёс, штамповка для пластмасс.	Низкая производительность и точность (8–9 степень по ГОСТ), применяется в единичном и мелкосерийном производстве, ремонте.
Метод обкатки	Профиль зуба формируется как огибающая множества положений режущих кромок инструмента при синхронном вращении инструмента и заготовки.	Червячная фреза для цилиндрических колёс, долбяк для цилиндрических и внутренних колёс, резцовые головки для конических колёс с круговым зубом.	Высокая производительность и точность, возможность обрабатывать колёса одного модуля с любым числом зубьев.
Зубофрезерование	Обработка червячной или дисковой фрезой.	Цилиндрические наружные и внутренние колёса, червячные колёса.	При использовании червячной фрезы — метод обкатки, при дисковой — копирования.
Зубострогание	Обработка двумя резами, которые образуют исходный контур впадины производящего колеса.	Конические прямозубые колёса.	Применяется на специализированных станках (например, 5A250, 5A283).
Протягивание	Использование длинного режущего инструмента (протяжки) с несколькими степенями резания.	Серийное производство, внутренние шлицы и зубчатые втулки.	Высокая производительность, применяется для крупносерийного производства.

Нарезание прямых зубьев конических колес осуществляется преимущественно методом обката на зубострогальных станках. Сущность метода заключается в воспроизведении зацепления обрабатываемого колеса с плоским или коническим производящим колесом, роль зубьев которого выполняют два резца – наружный и

внутренний. Резцы совершают возвратно-поступательное движение резания, а люлька с резцами и заготовка получают согласованное вращательное движение обката. За время поворота заготовки на один зуб люлька поворачивается на угол, соответствующий одному зубу производящего колеса.

Пример метода обката:



Процесс нарезания прямозубых конических колес характеризуется сравнительно невысокой производительностью из-за значительных затрат времени на холостые ходы инструмента. Впрочем, метод обеспечивает достижение 6–7 степени точности на станках повышенной точности и 7–8 степени на станках нормальной точности при использовании простого и недорогого инструмента. Важным преимуществом является универсальность метода – на одном станке с одним комплектом резцов можно обрабатывать конические колеса различных модулей и чисел зубьев.

Для нарезания конических колес с круговыми зубьями применяют зуборезные станки, работающие методом обката с использованием резцовых головок. Круговые (спиральные) зубья обеспечивают более высокую несущую способность передачи, плавность работы и пониженный уровень шума по сравнению с прямозубыми аналогами. Резцовая головка представляет собой дисковый инструмент диаметром 70–600 мм, на периферии которого размещаются наружные и внутренние резцы из быстрорежущей стали или твердого сплава.

Пример резцовой головки:



В процессе обработки вращающаяся резцовая головка совершает медленное качательное движение вокруг оси производящего колеса (движение обката), а заготовка вращается согласованно с этим движением. Движение обката и вращение заготовки кинематически связаны через делительный механизм станка таким образом, что за время поворота заготовки на один зуб люлька с резцовой головкой поворачивается на угол, соответствующий одному зубу производящего колеса. Процесс характеризуется высокой производительностью благодаря одновременной обработке обеих сторон зуба и возможности применения жестких режимов резания.

Специализированный инструмент и оборудование

Качество конических зубчатых колес в значительной степени определяется точностью применяемого зуборезного инструмента и оборудования. Для нарезания прямозубых конических колес используются зубострогальные станки моделей 5Б27, 5А250П, оснащенные специальными резцами с пластинами из быстрорежущей стали Р6М5 или твердого сплава Т15К6.

Пример зубострогательного станка 5Б27:



Конструкция резцов должна обеспечивать формирование требуемого профиля зуба и возможность многократной переточки без существенного изменения геометрических параметров.

Нарезание конических колес с круговыми зубьями требует применения специализированных зуборезных станков типа 5Т23А, 5240, 53А80, оснащенных резцовыми головками. Номенклатура резцовых головок весьма разнообразна – существуют головки для черновой и чистовой обработки, односторонние и двусторонние, правого и левого исполнения. Номинальный диаметр головки выбирается в зависимости от среднего конусного расстояния нарезаемого колеса, модуля и угла наклона зубьев по специальным таблицам ГОСТ 19326-73. последние годы для изготовления конических колес все шире применяются обрабатывающие центры с ЧПУ, оснащенные специальными зуборезными фрезами. Такое оборудование позволяет реализовать гибкие технологические процессы, сократить время переналадки при переходе на обработку колес другой номенклатуры и обеспечить высокую повторяемость параметров качества. Применение твердосплавного инструмента на станках с ЧПУ дает возможность повысить производительность обработки в 2–3 раза по сравнению с традиционными методами. Термическая обработка и финишные операции зубонарезания конические шестерни подвергаются термической обработке для достижения требуемых механических свойств материала. Для деталей из цементуемых сталей применяют цементацию (насыщение поверхностного слоя углеродом) с последующей закалкой и низким отпуском. Толщина цементованного слоя составляет 0,8–1,2 мм в зависимости от модуля и условий эксплуатации. Твердость поверхности зубьев после цементации и закалки достигает 58–62 HRC при твердости сердцевины 30–45 HRC. колес из улучшаемых сталей применяют объемную закалку с высоким отпуском (улучшение) или поверхностную закалку токами высокой частоты.

Последний метод обеспечивает высокую твердость рабочих поверхностей зубьев (50–56 HRC) при сохранении вязкой сердцевины, что повышает контактную прочность и износостойкость передачи при обеспечении достаточной изгибной прочности зубьев. обработка неизбежно вызывает деформации деталей, приводящие к снижению точности зубчатого венца на 1–2 степени. Для ответственных передач после термообработки выполняют финишные операции – зубошлифование, зубохонингование или притирку. Шлифование зубьев конических колес осуществляется на специальных зубошлифовальных станках типа 58K70В методом обката с применением тарельчатых или конических шлифовальных кругов.

Пример тарельчатого и конического шлифовального круга:



Процесс позволяет повысить точность колеса до 5–6 степени и обеспечить шероховатость поверхности зубьев $Ra = 0,63–1,25$ мкм.зубьев выполняется на зубопритирочных станках в зацеплении с чугунным притиром при подаче абразивной пасты в зону контакта. Процесс обеспечивает приработку рабочих поверхностей, улучшение контакта в передаче и снижение шероховатости до $Ra = 0,32–0,63$ мкм. Для контроля качества изготовленных колес применяют контрольно-обкатные станки, позволяющие оценить кинематическую точность передачи, плавность работы и характер пятна контакта зубьев. Особенности технологии изготовления гипоидных передач представляют собой разновидность конических передач со смещением осей, что обеспечивает ряд эксплуатационных преимуществ – повышенную нагрузочную способность, плавность работы, возможность рационального компоновочного решения. Однако смещение осей существенно усложняет технологию изготовления гипоидных колес. Зубья гипоидной передачи имеют сложную криволинейную форму, отличающуюся от эвольвентной, что требует применения специализированного оборудования и инструмента.гипоидных колес осуществляется на станках типа 5С268,

5С272Е методом обката с использованием специальных резцовых головок. При этом станок должен обеспечивать сложное согласованное движение инструмента и заготовки с учетом величины смещения осей и других геометрических параметров передачи. Настройка станка на обработку гипоидной пары требует высокой квалификации наладчика и тщательного расчета кинематических цепей. особенностью эксплуатации гипоидных передач является повышенная опасность заедания из-за значительного скольжения зубьев вдоль линии контакта. Это предъявляет особые требования к качеству рабочих поверхностей зубьев и применению специальных гипоидных масел с противозадирными присадками. После термообработки гипоидные колеса обязательно подвергают притирке для обеспечения правильного контакта в паре и удаления микронеровностей, являющихся концентраторами напряжений. Контроль качества и обеспечение точности требуемого качества конических зубчатых передач невозможно без организации эффективной системы контроля на всех этапах технологического процесса. Контроль точности конических колес осуществляется в соответствии с ГОСТ 1758-81, регламентирующим нормы точности и методы контроля конических передач. Стандарт устанавливает 12 степеней точности и предусматривает раздельное нормирование кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев. точность характеризует постоянство передаточного отношения и контролируется по кумулятивной погрешности окружного шага, радиальному биению зубчатого венца, погрешности профиля зуба. Плавность работы определяет уровень динамических нагрузок в зацеплении и оценивается по местной кинематической погрешности, отклонению шага зацепления. Контакт зубьев в передаче характеризуется размерами и расположением пятна контакта, которое проверяется на краску при обкатке колес под нагрузкой. измерения геометрических параметров зубьев применяют универсальные и специализированные средства контроля. Толщину зуба измеряют штангензубомером, нормальную хорду – индикаторным зубомером, биение зубчатого венца – индикаторной головкой при установке колеса в центрах. Более точные измерения выполняют на координатно-измерительных машинах, позволяющих определить отклонения профиля и направления зубьев с погрешностью менее 1 мкм. показателем качества термообработанных колес является твердость поверхности зубьев, которая контролируется на твердомерах типа ТК-2, ТШ-2М в нескольких точках по профилю зуба. Микроструктура материала оценивается металлографическим анализом шлифов, изготовленных из контрольных образцов или забракованных деталей. Глубина цементованного слоя измеряется по распределению твердости от поверхности вглубь материала.

Заключение

Изготовление конических шестерен представляет собой сложный технологический комплекс, включающий заготовительные операции, механическую обработку базовых поверхностей, нарезание зубьев, термическую обработку и финишные операции. Каждый этап процесса оказывает влияние на качество готовой передачи, что требует тщательного контроля параметров на всех стадиях производства. Тенденции развития технологии изготовления конических передач связаны с применением станков с ЧПУ и обрабатывающих центров, использованием твердосплавного инструмента, внедрением автоматизированных систем проектирования технологических процессов. Перспективным направлением является разработка комбинированных методов обработки, сочетающих резание и пластическое деформирование, что позволяет повысить производительность и качество поверхности зубьев. Совершенствование технологии изготовления конических шестерен должно быть направлено на повышение точности и стабильности процессов формообразования, сокращение вспомогательного времени, снижение материалоемкости и энергопотребления. Решение этих задач возможно на основе комплексного подхода, включающего модернизацию оборудования, разработку новых инструментальных материалов и покрытий, оптимизацию режимов обработки с использованием математического моделирования.

References

1. Иваненко Е.С. Применение 4-х координатного обрабатывающего центра с ЧПУ для изготовления конических зубчатых колес с круговым зубом // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований.
2. Макаров В.Ф., Горбунов А.С. Повышение качества и надежности зубьев спирально-конических шестерен технологическими методами // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета.
3. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Легейда В.Ю. Технологическое обеспечение ресурсосберегающих процессов изготовления цилиндрических зубчатых колес Известия Тульского государственного университета. Технические науки.
4. Писманик К.М., Шейко Л.И., Денисов В.М. Станки для обработки конических зубчатых колес. М.: Машиностроение, Технология нарезания круговых зубьев конических колес. Металлорежущее оборудование и САПР
5. Балков В.П., Каменецкий Л.И., Кирютин А.С., Негинский Е.А., Отт О.С., Пищулин Д.Н. Современные технологические подходы при изготовлении

цилиндрических зубчатых колес в условиях мелкосерийного производства и особенности расчета и проектирования зуборезного инструмента Металлообработка.

6. Виноградов В.М., Черепухин А.А. Зависимость точности изготовления цилиндрических зубчатых передач от точности изготовления их основных деталей и сборки Известия Московского государственного технического университета МАМИ

ENGINEERING APPLICATIONS

UDC 658.7

Barsbold B., Gerelmaa G. Feasibility study for optimizing spare parts supply

Barsbold. B., Gerelmaa G.

School of Management, University of Science and Technology
Global Leadership University

***Abstract.** This research work aims to identify opportunities and ways to optimize the management of spare parts supply resources on the example of “Energy Resources” LLC. The study used quantitative analysis methods based on ABC/XYZ classification, economic order quantity (EOQ), and historical data. The object of the study is the company’s spare parts orders, consumption, and delivery time data for 2016–2024. The analysis revealed that the stock level deviated from the optimal level by 15–20%, and a solution was developed to introduce an automated planning system. Optimization of spare parts supply proves the real possibility of reducing technical downtime and saving warehouse costs.*

***Keywords:** Spare parts inventory management, ABC analysis, EOQ model, Supply chain*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

The continuous operation of the mining industry directly depends on the availability of equipment. Optimizing the spare parts supply chain is a key factor in reducing operating costs and increasing productivity. [1]. However, the unstable demand for spare parts and long supply times make it difficult to implement an optimal resource management policy. For “Energy Resources” LLC, spare parts inventory accounts for a significant part of the operating costs. A shortage of spare parts causes technical downtime, while an excess of resources leads to the freezing of working capital [2]. Therefore, this study analyzed the current state of the company's spare parts supply and sought opportunities to optimize resources using mathematical modeling. Mining spare parts research focuses on three major solutions in practice: warehouse optimization (ABC, SLP, EOQ, (S,s)), mathematical optimization/stochastic modeling (multi-echelon, robust optimization), and criticality-based classification + MCDM. [3]. The purpose of this study is to analyze the current state of spare parts supply in the mining transportation sector, identify the challenges, and suggest possible ways to optimize the supply process.

The normal operation of mining equipment directly depends on the availability of spare parts. The study analyzed the relationship between spare parts turnover, delivery time, stock level, and cost using supply chain theory, logistics optimization, and resource planning methodologies. By combining quantitative and qualitative data, it was possible to

identify internal and external factors affecting the spare parts supply system.

The results of the study revealed the following main problems: poorly developed spare parts resource planning, non-optimal rotation classification, and high variability in supply time. In order to solve these problems, it was determined that it is necessary to implement measures such as refining supply planning, automating resource management, and establishing performance monitoring.

I. THEORETICAL OVERVIEW

In mining companies, spare parts supply is a strategic decision-making factor for ensuring production continuity, and failures in this system affect not only the efficiency of logistics, but also the productivity and cost structure of the entire organization. According to the main results of the conducted studies, the following basic system failures dominate the spare parts supply chain. [4].

First, the loss of resource estimation and uncertainty in demand-supply lead to a surplus or shortage of spare parts, which slows down the turnover of financial investments. When the demand forecasting model is poor, optimization based on reliability indicators such as MTBF and MTTR cannot be performed, and the planning efficiency is lost.

- *Second*, the long international supply cycle, combined with the size, weight, and transportation characteristics of mining equipment, further complicates the chain and increases the variability of supply time. As a result, the safety stock level is set higher than required, and the cost of warehousing tends to increase.

- *Third*, weak supplier reliability assessment poses a risk to the stability of supply, causing problems such as substandard parts, quality defects, and time discrepancies. Studies have shown that weak KPI systems that regularly evaluate supplier performance are a major cause of quality defects.

- *Fourth*, poor integration of warehouse management and information systems creates discrepancies between actual parts stocks and order information, creating conditions for making decisions based on outdated information. Research repeatedly shows that data errors increase when ERP, EAM, and CMMS systems are not fully integrated.

- *Fifth*, due to the characteristics of the mining industry, the backward procurement process and the complexity of coordination slow down the order coordination and increase the risk of production downtime.

The large number of procurement steps is the cause of the system to reduce the supply cycle. Finally, these problems together create high-cost risks such as reduced spare parts supply efficiency, reduced mining equipment service life, and increased unplanned downtime. According to the research level, it is necessary to integrate scientific methods

such as mathematical modeling in demand forecasting, supplier risk management, system integration, and process innovation to optimize the mining spare parts supply system.

The METRIC model developed by Sherbrooke was the first to scientifically demonstrate the ability to determine the stock level of repairable parts in accordance with the system availability requirements. The peculiarity of this model is that it introduces a mathematical method for solving the relationship between the randomness of demand, the repair cycle, and the multi-level resource positions. The METRIC method is the basis of all advanced models in the industry today [5]. Researcher Muckstadt developed a scientific systematic theory of the relationship between the supply of parts and service level indicators.

His work includes multi-level system optimization, risk analysis, and low-demand spare parts classification methods. His research has been of practical significance by integrating the theory of service level control with resource policies and developing decision trees and algorithms that are suitable for the characteristics of low-demand and high-value spare parts [6]. The spare parts supply system in the mining industry is an important component that directly ensures the reliability of equipment, machinery, and production operations, and poor organization of the resource, order, and supply processes is the main cause of technical downtime, maintenance delays, and inefficient costs. In this context, the study of supply theory, resource management, and logistics optimization methodologies is the basis of research. A supply chain is a system that efficiently manages the flow of goods and services from source to consumer, including planning, warehouse organization, and transportation management. This theory suggests a methodology for optimizing inventory levels, order frequency, delivery time, and risk management. Based on this, the study identified weaknesses in the parts supply chain structure and identified opportunities for performance improvement.

The theory of stock classification allows for the optimal determination of stock levels by classifying them according to turnover, price, and frequency of demand. ABC classification is a widely used method that provides guidance for management by dividing spare parts into high, medium, and low turnover categories. Also, mathematical models such as Economic Order Quantity (EOQ) allow for the optimal calculation of order volume, lead time, and cost. The study used these methods to analyze spare parts turnover, stock levels, and order frequency. Demand forecasting is essential for ensuring efficient supply operations, and taking into account historical consumption, demand variability, and seasonality can reduce lead times and reduce the risk of surpluses and shortages.

This study used a combination of methods such as system analysis, quantitative data analysis, and qualitative analysis to analyze warehouse records, delivery time statistics, and work process reports to identify the main factors affecting spare parts performance. The

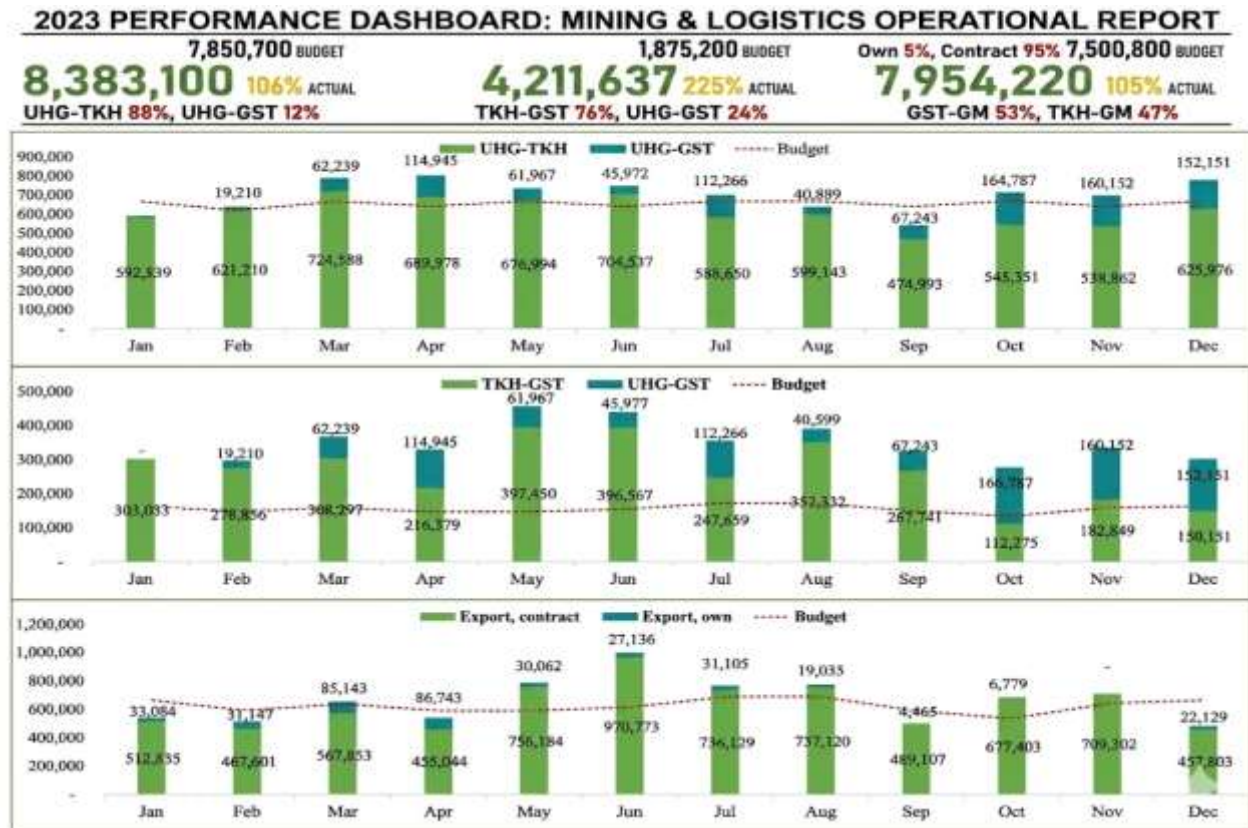
optimization methods proposed in the study were practical, aimed at reducing delivery time, reducing excess inventory, and reducing cost risks, which is the novelty of the study, and it is believed that they can make a real contribution to improving the spare parts supply system in mining organizations, ensuring equipment continuity, and increasing production productivity. When managing spare parts resources, it is effective to adopt a differentiated policy based on demand frequency and value. The theoretical basis of the study focuses on determining the strategic importance of spare parts by combining ABC and XYZ classification methods. In this study, the Economic Order Quantity (EOQ) and safety stock models were used to minimize resource costs in accordance with the characteristics of Mongolian mining logistics. The EOQ model was used to calculate the optimal order quantity.

II. RESEARCH SECTION

“Energy Resources” LLC is a nationally invested mining company established in 2005 and is one of the leading enterprises in the mining sector of Mongolia.

As part of the research, a detailed analysis of the planning, execution, stocking and shortages of spare parts supply in the planning section of the transport and logistics department of “Energy Resources” LLC was conducted. The study was based on the actual conditions of the company’s internal operations, documentary information, observations and interviews with relevant employees. The current state of spare parts supply at “Energy Resources” LLC is characterized by the lack of an automated system and the loss of planning management due to many manual processes:

- Order delays
- Technical downtime
- Cost increases
- Loss of income, etc. This leads to direct economic risks.



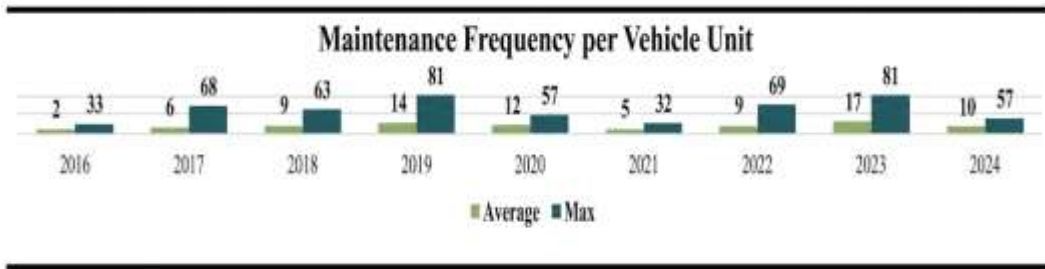
Source: Researcher's elaboration

Figure 1: Transportation of "Energy Resources" LLC, 2024

"Energy Resources" LLC's shipments in the UHG-TKH and UHG-GSCT routes in 2024 amounted to 8,383.1 thousand tons, exceeding the plan by 106%. Of this, the UHG-TKH route accounted for 88% and the UHG-GST route for 12%, indicating that the main flow of the company's coal exports is concentrated in the "Ukhaa Khudag – Tsagaankhad" route.

The supply of the Tsagaankhad-Gashuun Sukhait (TKH-GST) and Ukhaa Khudag-Gashuun Sukhait (UHG-GST) routes was compared. The total supply volume in these routes was 4,211.6 thousand tons, exceeding the plan by 225%, indicating an increase in export activity and improved border conditions. Overall, the company's coal supply was 7,954.2 thousand tons, exceeding the plan by 105%. It can be concluded that the fluctuation in supply between seasons increases sharply in March–May and September–October, which is directly related to market demand, border entry factors, and transportation conditions at that time.

The maintenance section completed 289,020 hours of maintenance work in 2024, with a staff of 254 people.



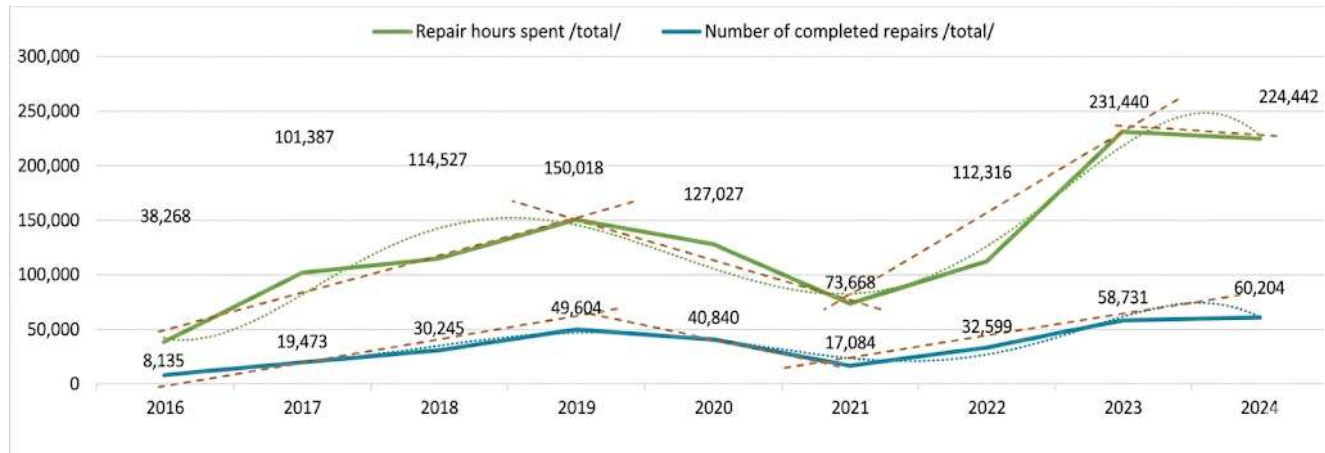
Source: Researcher’s elaboration

Figure 2: Vehicle repair frequency

The annual maintenance frequency of a unit of “Energy Resources” LLC from 2016 to 2024 shows the change in the frequency of maintenance of vehicles. Between 2016 and 2019, the maintenance frequency increased steadily, reaching its highest level in 2019, at 81 times. However, in 2020, the frequency decreased to 57 times due to the restrictions on operations and the decrease in transport volume during the COVID-19 pandemic.

In 2021, the maintenance frequency was the lowest at 32 times, due to weak technical operation, but increased again in 2022–2023, reaching 81 times, due to the resumption of mining operations. In 2024, it decreased again to 57 times, indicating that technical modernization, improved spare parts supply, and the effective implementation of the planned maintenance system were underway.

Category	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Repair Statistics Report (2016–2024)									
Welding	1,666	4,398	7,151	11,327	9,766	3,821	6,609	12,058	11,319
Tires	2,095	4,160	7,625	12,875	7,770	2,587	5,759	12,813	15,212
Electrical	118	456	2,408	5,811	4,469	2,052	3,653	8,954	8,931
Service Calls	1,777	4,534	4,611	6,380	7,105	3,080	5,816	9,248	8,942
Aggregates	1,838	4,994	6,928	11,039	10,052	4,862	9,831	13,026	12,588
Planned Maint.	604	730	1,356	1,903	1,453	592	807	2,274	2,876
Engine	37	201	166	269	225	90	124	358	376
Total	8,135	19,473	30,245	49,604	40,840	17,084	32,599	58,731	60,204
Total Repair Hours Spent (2016–2024)									
Welding	4,753	13,989	17,653	25,431	21,467	15,993	15,905	31,781	36,324
Tires	5,690	12,038	17,303	25,972	15,914	5,314	11,726	28,241	36,131
Electrical	414	2,308	5,779	10,932	8,562	4,709	8,325	18,542	15,586
Service Calls	6,925	18,326	19,001	21,276	19,882	8,381	13,824	30,328	26,932
Aggregates	16,388	42,087	43,974	50,016	47,457	31,224	51,903	87,524	77,902
Planned Maint.	3,063	2,657	5,093	8,223	7,262	4,809	5,603	16,781	14,941
Engine	1,035	9,983	5,724	8,169	6,483	3,240	5,030	18,244	16,626
Total	38,268	101,387	114,527	150,018	127,027	73,668	112,316	231,440	224,442



Source: Researcher's elaboration

Figure 3: Growth and decline graph

Energy Resources LLC's vehicle repair activities have fluctuated with a steady increase and decrease over the past nine years. In 2016, a total of 8,135 repairs were performed, spending 38,268 hours on them, while in 2019, the highest figure was reached, with 15,430 repairs and 150,018 hours of labor. This is due to the increase in the mine's transportation load and a sharp increase in equipment utilization during those years.

The number of repairs and hours spent in 2020 sharply decreased (12,093 repairs and 127,027 hours) due to the closure of borders and the slowdown in transportation activities due to the COVID-19 pandemic. This was followed by a decrease in the lowest level in 2021, with 7,368 repairs and 73,668 hours, due to operational restrictions, disruptions in the supply of spare parts, and a decrease in transportation. However, starting in 2022, due to the economic recovery and increased exports, the number of repairs and hours spent increased sharply, reaching 23,599 repairs and 231,440 hours in 2023, and 60,204 repairs and 224,442 hours in 2024. This indicates that the mine has started operating at full capacity, the intensity of technical utilization has increased, and the planned and preventive maintenance policy is being actively implemented. By subcategory:

- Welding, tire, and unit repair types account for about 70 percent of total time spent.
- Although the share of planned and engine repairs is small, they are characterized by long time spent per unit of work and require complex operations.

Overall, the total number of vehicle repairs increased by 7.4 times between 2016 and 2024, while the time spent increased by 5.8 times, which is related to the efficiency of technical operation, load, spare parts supply conditions, and internal repair planning. Spare parts supply activities are affected by many factors, including the company's internal organization, technical planning, system solutions, as well as foreign markets, supplier conditions, and

transportation environment. These are classified into internal and external factors and analyzed as follows.

Internal factors

1. Unsystematic planning

- Planning staff orders spare parts based on their experience and previous year's needs
- No statistical analysis-based planning methods or software
- Limited ability to monitor the quality of spare parts supply

2. No stocking policy

- Excess and shortages coexist

External factors

1. Foreign supplier terms and conditions

- Many types of spare parts are sourced from China and European countries
- Fluctuations in global supply, factory production schedules, and export restrictions

directly affect

- The average foreign order lead time is 30–45 days, and it is not possible to deliver quickly when needed

2. Road, transportation, and border customs conditions

- When supplying spare parts via international routes, they are subject to customs and border delays

- Some spare parts require special permits and laboratory tests, so they take time at customs

3. Exchange rates and transportation tariffs

- Since most spare parts are denominated in US dollars and yuan, exchange rate fluctuations will affect supply costs

- A sharp increase in foreign exchange rates causes a difference between the preliminary budget and the confirmed order

- International transportation tariffs and fuel prices increase the cost of supply

4. Supplier responsibilities and contracts

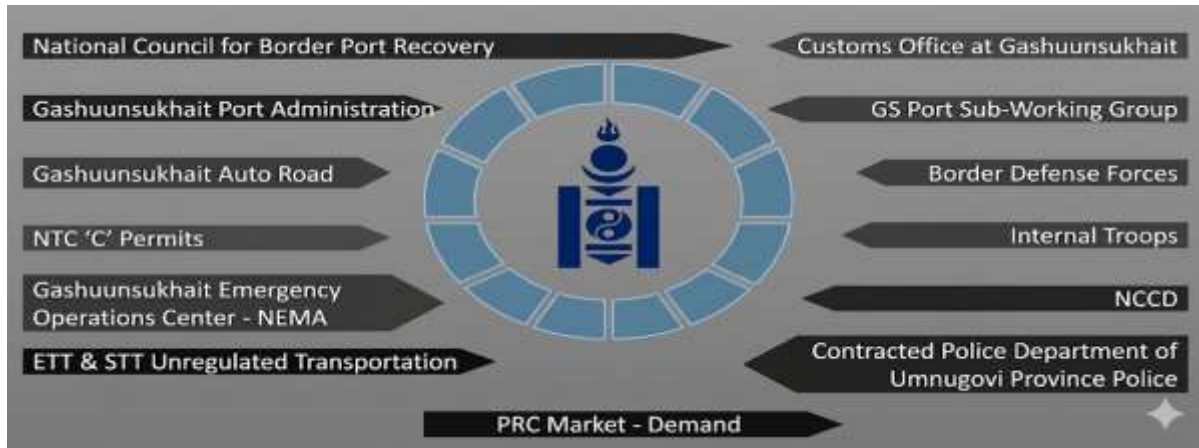
- In some cases, the contracted supplier:

- Delivering the wrong quantity

- Taking too long to transport to do

- Problems arise due to incorrect packaging and numbering of spare parts, etc.

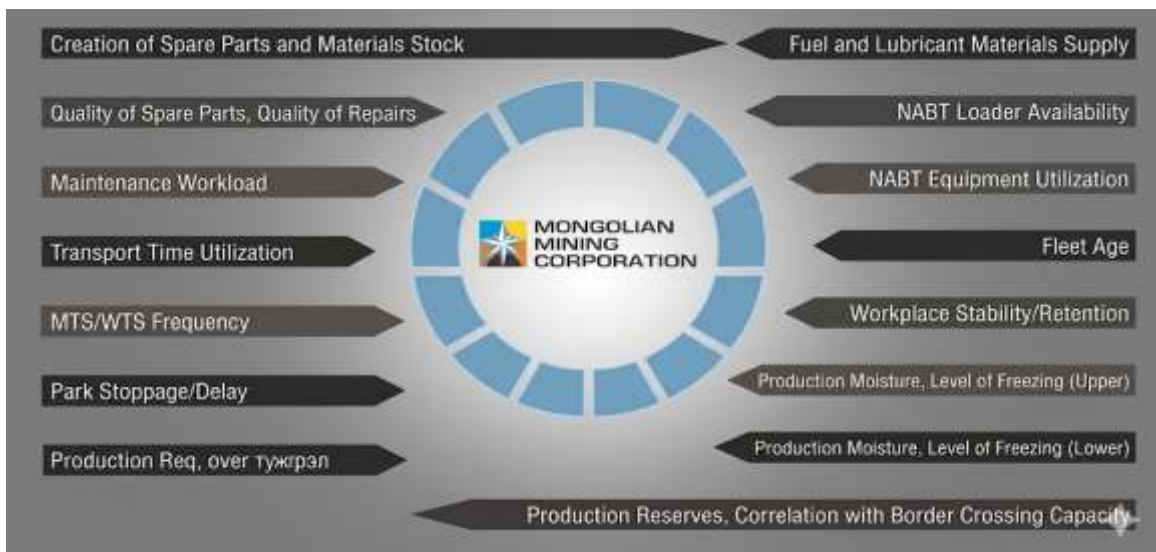
These create the risk of incorrect registration in the warehouse and technical downtime.



Source: Researcher's elaboration

Figure 4: Strategically important coal deposits

The following summarizes the external environmental institutions and policy factors that directly and indirectly determine the coal transportation performance of “Energy Resources” LLC. Transportation operations are not only related to the company’s internal planning and technical operation, but also depend to a large extent on the decisions and regulations of state and border control agencies, infrastructure capacity, and border crossing conditions.



Source: Researcher's elaboration

Figure 5: Internal factors influencing transport production

The main internal factors determining the coal transportation performance of “Energy Resources” LLC are summarized. These factors directly affect the level of transportation performance in conjunction with the company’s technical readiness, material supply, labor

organization, human resource stability, and effective management. Spare parts supply is a system that is not only dependent on unit planning, but also on all levels of operations and is very sensitive to the impact of the external environment. “For Energy Resources” LLC, internal factors such as internal structure, lack of integrated systems, and human resource burden are causing the main supply failures, while factors such as instability of external supply, border and customs, and currency risks are making it even more difficult.

Table 1

Factor correlation and impact on supply

Factors	Impact
Unsystematic planning	Duplicate orders, delays, incorrect registration
Unstandardized warehousing	Excess inventory, registration discrepancies, worn out and rusty spare parts due to non-compliance with operational requirements
Human resource experience and skills	Planning, registration errors, lack of control
Currency appreciation	Increased order costs, over-planning of the package
Customs, border, logistics	Delayed deliveries, increased transportation time
Supplier misconduct	Defective spare parts arriving, technical commissioning delays

Source: Developed by the researcher

Parts Classification and ABC Analysis

ABC analysis is used to classify the total consumption of parts by cost and to plan for the most costly and high-risk categories

Table 2

ABC Classification of Company Parts

Category	Share of total spare parts assortment	Share of cost	Analysis value
Group A	15%	70–75%	Very expensive, if interrupted, the equipment will be stopped
Group B	25%	20–25%	Average cost, constant use
Group C	60%	5–10%	Low cost, some are hardly used

Source: Developed by the researcher

The spare parts consumption of “Energy Resources” LLC was taken from the report for January–December 2024 and ABC classification was performed as follows. It includes:

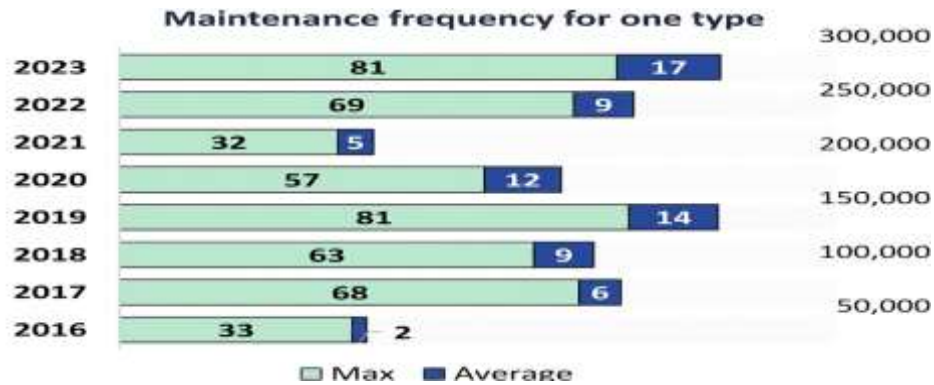
- Spare parts included in category A: engine block, hydraulic pump, turbine, differential
- Category B: filters, gasket sets, gas system spare parts
- Category C: small parts, rubber, seals, leak-proof fluids, labels, etc.

Importance of ABC analysis:

- More detailed planning and special stocking policies are required for spare parts in category A

- For categories B and C, it is necessary to use warehouse space optimally and improve stock turnover

Demand forecasting and supply chain analysis. Spare parts demand is often driven by technical failures, planned repairs, and replacements, and this demand is not constant and fluctuates seasonally.



Source: Developed by the researcher

Figure 6: Maintenance information

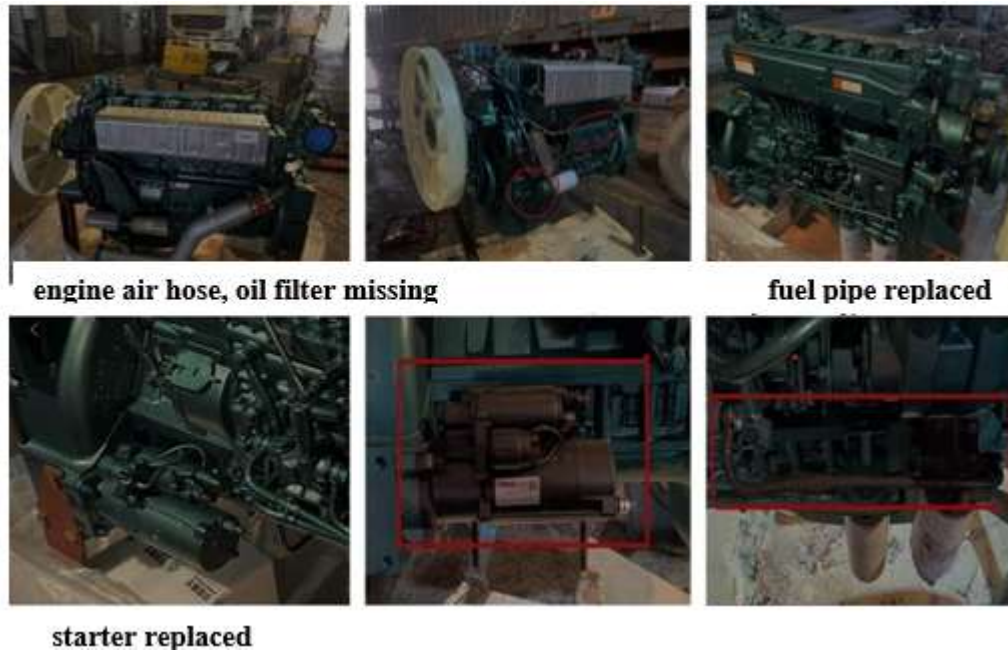
The efficiency of spare parts supply has a significant impact on ensuring technical reliability in the mining industry, reducing planned and unplanned downtime, and ensuring production continuity. For Energy Resources LLC, the spare parts reservation, ordering, and supply process is currently fragmented and unsystematic, and the information transfer is based on manual operations, which leads to disruptions, redundancy, and increased costs.



Source: Developed by the researcher

Figure 7: Comparison of maintenance activities

The current state of spare parts supply and research show that the company's spare parts planning, inventory, control, and supply processes lack an integrated and intelligent information system, which leads to various failures and losses.



Source: Researcher's elaboration

Figure 8: Information on substandard spare parts

Therefore, within the framework of this research, the requirements, direction and content of the development of the spare parts supply system were determined, taking into account the following grounds.

System development requirements. The company's spare parts flow includes the following main processes. These include:

1. Technical breakdowns and planned repairs
2. The emergence of spare parts needs
3. Sending orders
4. Checking the balance in the warehouse
5. Communication with external and internal suppliers
6. Receiving and recording
7. Operation and reporting

In the current situation, the above processes are carried out separately, predominantly manually, and based on Excel, email, and telephone communication, which leads to:

- Planning errors
- Resource surpluses and shortages
- Uncoordinated supply
- Weakened performance control.

Therefore, it is necessary to develop an integrated spare parts management system to solve these problems and streamline information flow.

The main goals of system development are:

- Real-time monitoring of spare parts orders, supplies, income, and expenses
- Data-based support for planning and decision-making
- Enable recording and analysis of spare parts life cycles
- Reduce losses caused by duplicate orders, registration errors, and downtime

Table 3

Development directions

Direction	Content
ERP Solutions	Integrated order-supply-warehouse-usage-reporting platform
CMMS (Computerized Maintenance Management System)	Link technical breakdown and repair plans to spare parts orders
Data Modeling	Record each spare part code, usage frequency, cost, and time in the system
KPI Monitoring	Monitor performance indicators such as delivery time, order fulfillment, and warehouse turnover
Alerts and Reminders	Automatic warning when resource levels are low
Analytic Reporting	Planning based on demand modeling and ABC/XYZ analysis

Source: Developed by the researcher

The main modules of the development system. The proposed system consists of the following 5 main modules.

Table 4

The main modules of the development system

Modules	Responsibilities
Order and consumption accounting	Record and create history of spare parts needs
Resource control	Monitor warehouse balances and income and expenses for each batch
Supply management	Monitor order progress and supplier performance
Planning and forecasting	Automatically forecast based on demand, frequency, and necessary resources
Reporting and analysis	Generate KPI, cost, ABC, XYZ reports, provide decision support, and view visual reporting dashboards instantly

Source: Developed by the researcher

Table 5

Expectations for development outcomes

Results	Description
Reduced order lead times	Reduce manual work by 50-70%, and information flows in real time
Reduced technical downtime	More accurate resource planning management will increase the availability of equipment
Reduced revenue losses	Reduce the time spent on repairs and waiting, ensuring equipment availability
Reduced warehousing costs	Improve warehouse turnover by reducing excess inventory and increasing space utilization
Improved management decision-making	Reduce the time spent on decision-making based on data and analysis, and increase the level of optimization

Source: Developed by the researcher

To solve the problem of spare parts supply, it is necessary to update the basic structure of the organization's operations through system development, not only by changing the warehouse and supply department. According to the analysis and research results of the current situation of the spare parts supply system, "Energy Resources" LLC has system weaknesses in key indicators such as information, planning, execution coordination, and decision-making support within the logistics system. It is clearly observed that this directly affects the efficiency of the company's spare parts supply, leading to technical failures, operational delays, and loss of revenue. Based on this, the requirements for developing an integrated logistics subsystem to systematize and automate the spare parts supply management process and support data-based decision-making were determined within the framework of this research work, and the framework for system development was determined based on the following theoretical and practical foundations.

The need and reasons for system development. According to the study, the following main reasons create the urgent need to systematize the spare parts supply system. These include:

- The registration of spare parts classification, usage, and cost information is not standardized and duplicated
 - It is impossible to monitor the performance of orders, reserves, and supplies in real time
 - There is no model for predicting supply time
 - There is a lack of a contract and performance monitoring system with suppliers
 - It is impossible to systematically record the life cycle and usage history of spare parts

- The ability to make decisions based on information is weak, and reports are processed manually

In order to correct and improve the above problems, a combined solution of ERP and CMMS based on information that is consistent with the company's operations is proposed within the framework of system development.

Development structure and components

The proposed system consists of the following main sub-modules:

1. Technical breakdown and repair registration module (CMMS)

- Recording of breakdowns, repairs, and spare parts consumption for each machine

2. Spare parts order and reserve management module

- Monitoring the order stage and calculating delivery time
- Setting minimum resource levels and safety buffers
- Creating automatic alerts and shortage notifications

3. Supplier performance monitoring

- Monitoring the fulfillment of SLA or service level agreement
- Creating performance indicators for time, quality, and integrity

4. ABC–XYZ classification and demand forecasting analytical module

- Determining spare parts classification and optimizing planning
- Dynamic planning based on demand fluctuations

5. Reporting and decision support

- Comparative reports on usage, resources, and order performance
- Dashboards based on KPI (key performance indicator)

Development stages and implementation status It is considered optimal to perform the following stages when developing the system:

1. Identifying requirements and mapping user problems
2. Analyzing current processes and performing BPR
3. Developing data modeling and registration coding
4. Selecting and developing software solutions (ERP, CMMS)
5. Testing, training, and pilot use
6. Formal introduction and performance monitoring

Expected results. The following improvements will be achieved as a result of the system development. For example:

- Spare parts outages and technical downtime will be significantly reduced
- Order and supply management will be automated and speed will improve
- Warehouse turnover will increase and excess investment will be reduced
- Management decisions will be based on data and calculations

- Control and accountability in relations with suppliers will be improved

The development of a spare parts logistics system is not only a technical issue, but also an important strategic step to optimize the organization's business processes and support data-based management decisions. Therefore, the phased implementation of the system in the future and the creation of an integrated use of ERP and CMMS systems will be the main conclusion of this study and the basis for the next stage of development.

III. CONCLUSION

This research work is aimed at optimizing the spare parts supply system and creating an efficient and reliable system. Based on the example of "Energy Resources" LLC, it successfully combines the theory and practical methods of logistics. The specifics of the mining industry and the high requirements for technical continuity require that the planning, stocking, and supply organization of spare parts be optimized at the strategic level.

When managing spare parts resources, it is effective to adopt a differentiated policy based on demand frequency and value. The theoretical basis of the research is aimed at determining the strategic importance of spare parts by combining ABC and XYZ classification methods. In this study, the Economic Order Quantity (EOQ) and safety stock models were used to minimize resource costs in accordance with the specifics of Mongolian mining logistics.

The optimal order quantity is calculated using the $EOQ = \text{Square Root } (2DS/H)$ model. The study found that the following problems exist in spare parts supply. These include: overdependence on suppliers, late orders, duplication of resources, and planning uncertainty, which are the main factors that increase costs and cause technical downtime. During the study, theoretical methods such as EOQ, ABC analysis, safety stock calculation, demand forecasting, flow and cause-and-effect diagrams were used to evaluate the current supply performance and develop optimal solutions. In addition, the study found that the terms of contracts with suppliers should be based on key performance indicators, be more stringent, and be more controllable.

The risk of spare parts supply is related to over-dependence on a single supplier, weak contract protection, and poor data processing infrastructure. Therefore, in order to improve the efficiency and reliability of supply, it is necessary to update the contracts with suppliers based on performance criteria and accountability conditions, and on the other hand, it is necessary to abandon traditional tools such as Excel and introduce an automated system for integrated management of logistics and resource information. Therefore, the results of this study can serve as a basis for practical solutions, proposals, methods, and system improvements that can be implemented not only in the internal operations of the organization,

but also in other organizations in the mining and manufacturing sectors that operate in the same way. In the future, the stability, flexible organization, and automation of the supply chain will be the main drivers for increasing the competitiveness and productivity of the industry.

References

1. Zipkin, Foundations of Inventory Management, 2000
2. Jaakko Huiskonen, "Maintenance Spare Parts Logistics: Special Characteristics and Strategic Choices", Journal of Purchasing & Supply Management, 2001
3. Şenses, Sena, Gölbaşı, Onur, Bakal, İsmail Serdar. A spare parts inventory optimization study in mining, Pamukkale university journal of engineering sciences-pamukkale universitesi muhendislik bilimleri dergisi, 2022
4. Zhang et al, "A Comprehensive Review of Spare Parts Inventory Management: Classification, Trends, and Future Directions", International Journal of Production Research, 2021
5. Craig C. Sherbrooke, Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques (2nd Edition), 2004
6. John A. Muckstadt, Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains, 2005
7. Guo, Y., Shi, Q., & Guo, C. (2022). Multi-Period Spare Parts Supply Chain Network Optimization under (T, s, S) Inventory Control Policy with Improved Dynamic Particle Swarm Optimization. Electronics, 11(21), 3454.
8. Wu, J., Liu, H., Zuo, H., Cheng, Z., Yang, Y., Ma, Y., & Kong, L. (2021). The Demand Supply Steady-State Process-Based Multi-Level Spare Parts Optimization. Sensors, 21(24), 8324.
9. Soltani, M. (2018). Joint Optimization of Opportunistic Predictive Maintenance and Multi-location Spare Part Inventories for a Deteriorating System Considering Imperfect Actions. ArXiv preprint.
10. Han, S., Noro, T., & Ho, K. (2024). Analysis and Design of Satellite Constellation Spare Strategy Using Markov Chain. ArXiv preprint.
11. Chen, Y.-k., Gao, Q., Su, X.-b., Fang, S., & Guo, C.-m. (2018). Research on Optimization of Spare Parts Inventory Policy Considering Maintenance Priority. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 9(6), 1336–1345.
12. Gao, J. D., Zhang, Y., Zhou, F. J., & Mao, H. L. (2014).
13. Research on Control Model for Spare Parts Inventory Based on the Optimal Replenishment Cycle, Applied Mechanics and Materials, 519–520, 1390–1394.
14. Şenses, S., Gölbaşı, O., & Bakal, İ. S. (2022). A spare parts inventory optimization study in mining. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences.

15. Wang, Z., ... (2025). Research on the optimization method of inventory management of important spare parts of intercity railway. PLOS One.

16. Rahimi-Ghahroodi, S., Al Hanbali, A., Vliegen, I. M. H., & Cohen, M. A. (2019). Joint optimization of spare parts inventory and service engineers staffing with full backlogging. International Journal of Production Economics, 212, 39–50.

17. Pang, C. (2022). Management Optimization of Equipment Maintenance and Spare Parts for Automobile Intelligent Manufacturing Enterprises. International Journal of Frontiers in Engineering Technology.

18. АШИГТ МАЛТМАЛ, ГАЗРЫН ТОСНЫ ГАЗАР

19. <https://www.energyresources.mn/>

UDC 621.634

Krasnova M.N., Startsev A.S. Development of a slipway for assembling the guide apparatus of axial ventilation equipment

Разработка стапеля для сборки направляющего аппарата осевого
вентиляционного оборудования

Krasnova Marina Nikolaevna

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology

Startsev Artyom Sergeevich

Master's student of the MTM-241 group

Voronezh state technical university, PhD in technical science,

Краснова Марина Николаевна

Доцент кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического
университета, к. т. н,

Старцев Артем Сергеевич

Магистрант группы мТМ-241

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования "Воронежский государственный технический университет"

Abstract. *The article discusses the design of a welded slipway (process equipment) intended for the assembly and welding of the guide apparatus of axial industrial ventilation equipment. The designed slipway ensures the correct positioning of the guide apparatus structure elements and their mutual arrangement during the welding process. The solid assembly model of the slipway was developed in the KOMPAS-3D CAD system.*

Keywords: *solid model, guide apparatus, axial fan, slipway, KOMPAS-3D*

Аннотация. *В статье рассматривается проектирование сварного стапеля (технологической оснастки), предназначенного для сборки-сварки направляющего аппарата осевого промышленного вентиляционного оборудования. Спроектированный стапель обеспечивает правильное позиционирование элементов конструкции направляющего аппарата и их взаимное расположение в процессе сварки. Твердотельная сборочная модель стапеля разработана в САПР КОМПАС -3D*

Ключевые слова: *твердотельная модель, направляющий аппарат, осевой вентилятор, стапель, КОМПАС-3D*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Направляющий аппарат (рис.1) является важной составляющей конструкции осевых промышленных вентиляционных вентиляторов, применяемых в горнодобывающей промышленности (для проветривания шахт и карьеров). Конструктивно он представляет собой сборочный узел, включающий неподвижно установленные профильные лопатки (данный вариант рассматривается в статье) либо профильные лопатки с регулируемым углом наклона относительно оси вращения рабочего колеса. Направляющий аппарат устанавливается перед рабочим колесом и

предназначается для подачи в него воздушного потока в определенном направлении и преобразования значительной части кинетической энергии потока (динамического давления) в потенциальную (статическое давление) [1], [2], [3]. В данной статье рассматривается процесс разработки стапеля – технологической оснастки для сборки направляющего аппарата.

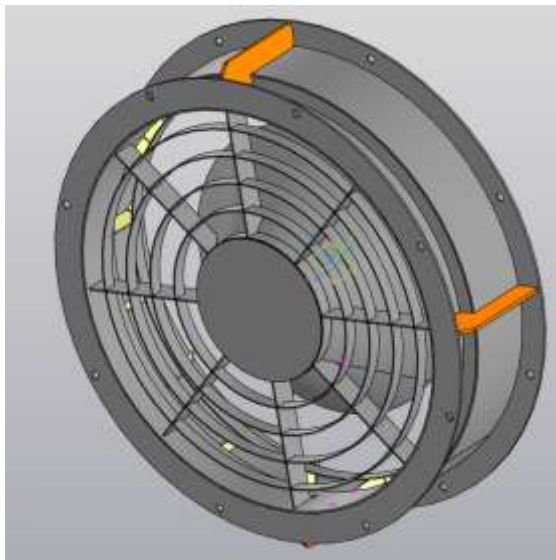


Рис. 1. Твёрдотельная модель сборки направляющего аппарата, выполненная в Компас-3D

Разработка стапеля

Стапель (рис. 3) представляет собой сборную сварную платформу, состоящую из плиты-основания и пластин-упоров, обеспечивающих закрепление и правильное взаимное расположение элементов конструкции направляющего аппарата (показано на рис. 2, б) [4], [5]. Стапель спроектирован таким образом, чтобы сборка и сварка производилась на специальном столе, при этом правильное позиционирование элементов направляющего аппарата обеспечивается болтовым соединением его фланца с соответствующими отверстиями в плите-основании стапеля и рядом пластин-упоров, служащих для закрепления обечаек, рёбер, лопаток и других элементов направляющего аппарата .

На начальном этапе разработки стапеля производится проектирование Основания 1 (рис. 3), которое является основным элементом конструкции, на котором устанавливаются все остальные детали. В целях обеспечения удобного, быстрого и более точного позиционирования всех деталей на Основании стапеля на этапе его сборки, в нём проделываются отверстия, в которые будут устанавливаться шипы всех деталей, размещённых на нём. Также в Основании проделываются отверстия, число и диаметр которых соответствует отверстиям во «Фланце обечайки Б» направляющего

аппарата, через которые будет осуществляться болтовое соединение стапеля с направляющим аппаратом

Следующим этапом является проектирование пластин-упоров, устанавливаемых на Основании стапеля и предназначенных для закрепления и обеспечения правильного взаимного расположения деталей направляющего аппарата при его сборке. Каждая такая пластина-упор несёт функцию позиционирования определённого элемента конструкции направляющего аппарата. В конструкции данного стапеля имеется 5 различных упоров. Нужно учитывать, что ряд деталей направляющего аппарата (рис. 2) – Фланец обечайки А 3, Обечайка А 1, Фланец соединяющий обечайки 4, Обечайка Б 2, Фланец Обечайки Б 16, поступают на этап сборки на стапеле в уже сваренном между собой виде. Также уже сваренными на стапель устанавливаются детали Конус обтекателя 6, Кольцо А решётки 9, Заглушка 14.

Рассмотрим назначение и принципы проектирования каждого из упоров стапеля (рис. 4). Пластина А 2 выполняет функцию закрепления и позиционирования деталей «Луч» направляющего аппарата относительно друг друга, обеспечивая их правильное радиальное распределение с шагом 45 градусов. В Пластине А проделан паз, в который до упора вставляется «Луч», при этом длина пластины А и глубина паза подобраны так, чтобы обеспечивалось необходимое положение детали «Луч» относительно деталей «Конус обтекателя» и «Кольцо А решётки». Для закрепления каждой детали «Луч» требуется не менее двух Пластин А. Чтобы повысить прочность соединения Пластин А с основанием стапеля и снизить нагрузки, действующие на них, между ними расположена Пластина Б 3, являющаяся по сути ребром жёсткости, связующим две пластины А в один более прочный блок. Пластина Б приваривается как к основанию, так и к каждой из двух Пластин А.

Важным моментом при сборке направляющего аппарата является обеспечение соосности деталей «Обечайка А», «Обечайка Б» с деталью «Конус обтекателя». Для достижения этого условия на Основание 1 стапеля устанавливаются следующие радиально расположенные в количестве 8 штук каждый упоры – Пластина В 4 и Пластина Г 6. При этом Пластины В предназначены для правильной установки и закрепления детали «Конус обтекателя», который входит в блок уже сваренных деталей вместе с деталями «Кольцо А решётки» и «Заклушка». А Пластины Г в свою очередь выполняют функции правильной установки детали «Обечайка Б». Стоит отметить, что Пластины В имеют выступ, в который своей задней частью упирается Конус обтекателя. Высота этого выступа обусловлена заданием необходимого вылета задней части «Конуса обтекателя» относительно задней части «Обечайки Б», либо же, что равнозначно, задней поверхности «Фланца обечайки Б» направляющего аппарата.

Для закрепления и правильного позиционирования деталей «Лопатка противосрывная» направляющего аппарата в конструкцию стапеля (рис. 3) входят

детали Упор лопатки 7. Они представляет собой пластины, с выступом, задающим вылет детали «Лопатка противосрывная» относительно задней части детали «Обечайка Б» и пазом, повторяющим форму изогнутого профиля лопатки, в который они и устанавливаются. Для более точного и надёжного закрепления детали «Лопатка противосрывная» на каждую такую лопатку приходится по два Упора лопатки 7. Так как сама лопатка является довольно узкой, между упорами остаётся слишком мало места, для того чтобы разместить там ребро жёсткости, связавшее бы их в один блок и уменьшившее нагрузку, как сделано с пластинами А 2. По этой причине было принято решение снабдить Упоры лопаток 7 значительным расширением в их задней части, чтобы увеличить площадь контакта с Основанием 1.

В процессе сварки стапеля (рис. 3) Основание 1 испытывает значительные напряжения, вызванные температурными изменениями, что может стать причиной его коробления, приводящим в негодность всю конструкцию. Кольцо жёсткости 7 выполняет функцию укрепления стапеля, делает всю конструкцию более жёсткой, менее подверженной перемещениям (короблению).

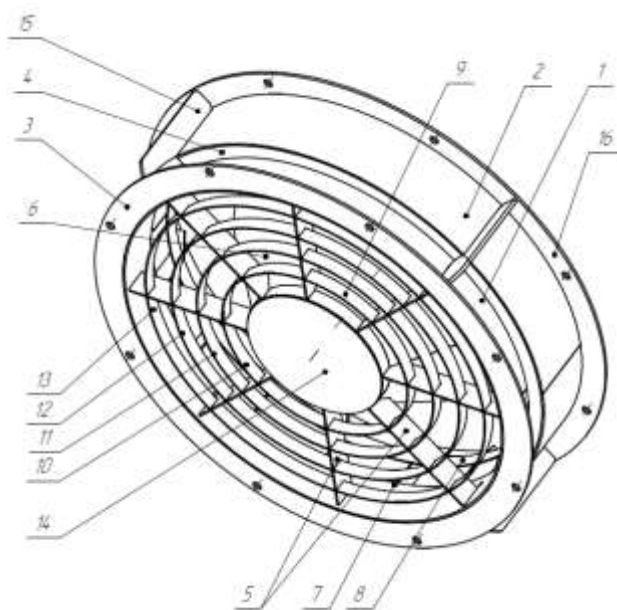


Рис. 2. Элементы конструкции направляющего аппарата

1 – Обечайка А; 2 – Обечайка Б; 3 – Фланец обечайки А; 4 – Фланец соединяющий обечайки; 5 – Луч; 6 – Конус обтекателя; 7 – Лопатка противосрывная ; 8 – Кольцо лопаток; 9 – Кольцо А решётки; 10 – Кольцо Б решётки; 11 – Кольцо В решётки; 12 – Кольцо Г решётки; 13 – Кольцо Д решётки; 14 – Заглушка; 15 – Ребро усиления; 16 – Фланец обечайки Б

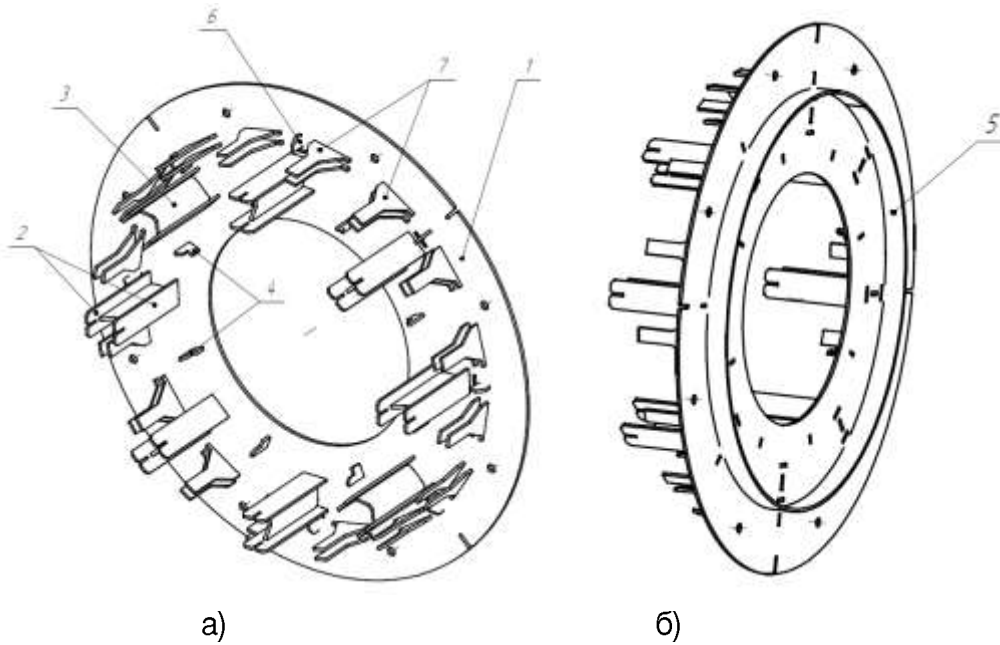


Рис. 3. Конструктивные элементы стапеля направляющего аппарата
а) – вид с передней стороны; б) – вид с задней стороны
1 – Основание; 2 – Пластина А; 3 – Пластина Б; 4 – Пластина В; 5 – Кольцо жёсткости;
6 – Пластина Г; 7 – Упор лопатки

Для изготовления всех деталей, входящих в конструкцию стапеля применяется следующее оборудование:

- Станок плазменной резки металла с ЧПУ Giperplasma START



Рис. 4. Внешний вид станка Giperplasma START

Таблица 1

Основные технические характеристики станка Giperplasma START [7]

Входное напряжение / частота	220 ± 10% В / 50/60Гц
Потребляемая мощность	до 3 кВт
Точность резки по ГОСТ 14792-80 – П1110	1 класс точности
Точность позиционирования / вычерчивания контур	± 0,2 мм/1000 мм / ± 0,2 мм/∅ 500 мм
Максим. размеры раскраиваемого листа	3000 x 1500 мм
Диапазон рабочих скоростей	от 50 до 15000 мм/минуту
Габариты оборудования (ШхДхВ), мм / Вес	2300x4000x2000 / 1800 кг
Тип раскройного стола/Управление	Вентиляционный/Управление с ЧПУ

- Вальцы гидравлические Акуарак АНС 20-06



Рис. 5. Внешний вид вальцов гидравлических Акуарак АНС 20-06

Таблица 2

Основные технические характеристики вальцов гидравлических Акуарак АНС 20-06 [6]

Рабочая длина гибки, мм	2100
Максимальная толщина листа, мм	8
Диаметр верхнего вала, мм	190
Диаметр боковых валов, мм	150
Диаметр нижнего вала, мм	170
Мощность двигателя, кВт	3
Габаритные размеры ДхВхШ, мм	4042x1254x1380
Вес, кг	3290

Разработанная конструкция стапеля для сборки направляющего аппарата осевого промышленного вентилятора отвечает возложенным на неё функциям (задание взаимного положения деталей в процессе сборки) и является довольно удачной с точки зрения технологичности, так как для изготовления не требует специального сложного оборудования и больших затрат времени.

References

1. Ивановский И.Г. Шахтные вентиляторы: Учеб. пособие.— Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. – 196 с. илл. 86, табл. 7
2. Калинушкин М.П. Вентиляторные установки: Учеб, пособие для строит, вузов.— 7-е изд. перераб. и доп. — М.: Высш, школа, 1979.—223 с., ил.
3. Семидуберский М. С. Насосы, компрессоры, вентиляторы. Учебник для техникумов, Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Высш. школа», 1974. 232 с. с ил.
4. Толстых, А. В. *Насосы, вентиляторы и компрессоры: учебное пособие* / А. В. Толстых, Ю. Н. Дорошенко, В. В. Пенявский. - Томск : ТГАСУ, 2018. - 160 с.
5. Степанов А.И. Центробежные и осевые компрессоры, воздуходувки и вентиляторы Теория, конструкция и применение / Пер. с англ. инж. И.И. Резника. — Москва : Машгиз, 1960. — 347 с. ил.; 23.
6. Вальцы гидравлические Акырак АHS 20-06 // ENERGOSTAN. – URL: https://www.energostan.ru/stanki/valtsyi_valtsovochnyie_stanki/valtsyi_gidravlicheskie_Akyrak_AHS_20-06/ (дата обращения: 19.05.2026). – Текст: электронный
7. Станок плазменной резки металла с ЧПУ Giperplasma START // RIATECH20. – URL: https://riatech.pro/catalog/stanki_plazmennoy_rezki_s_chpu/10252/ (дата обращения: 19.05.2026). – Текст: электронный

UDC 620:193

Sadvokasova D.A., Latypov V.M. The life cycle of an investment and construction project: from the formation of an idea to the operation of a real estate object

Жизненный цикл инвестиционно-строительного проекта: от формирования замысла до эксплуатации объекта недвижимости

Sadvokasova Dana Almatovna,

student, group MPG-03-24-01, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

Latypov Valery Markazovich,

professor, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

Садвокасова Дана Алматовна,

студент группы МПГ-03-24-01, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

Латыпов Валерий Марказович,

профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

Abstract. *The article is devoted to a comprehensive analysis of the life cycle of an investment and construction project as a complex system of legal, financial and technical processes. The main stages of the project implementation are consistently considered: from the formation of an idea, site selection and registration of permits to design using BIM technologies, construction and subsequent operation. Special attention is paid to the impact of each stage on economic efficiency and safety. It is summarized that a systematic approach to lifecycle management minimizes risks and ensures project sustainability.*

Keywords: *investment and construction project, life cycle, developer, urban planning regulation, project documentation.*

Аннотация. *Статья посвящена комплексному анализу жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта как сложной системы правовых, финансовых и технических процессов. Последовательно рассматриваются основные этапы реализации объекта: от формирования идеи, выбора участка и оформления разрешительной документации до проектирования с применением BIM-технологий, строительства и последующей эксплуатации. Особое внимание уделяется влиянию каждого этапа на экономическую эффективность и безопасность. Резюмируется, что системный подход к управлению жизненным циклом минимизирует риски и обеспечивает устойчивость проекта.*

Ключевые слова: *инвестиционно-строительный проект, жизненный цикл, застройщик, градостроительное регулирование, проектная документация.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Инвестиционно-строительный проект представляет собой сложную систему последовательных действий, объединяющую правовые, организационные, технические и финансовые процедуры. Его реализация охватывает весь жизненный цикл объекта недвижимости — от возникновения идеи и выбора земельного участка до ввода здания в эксплуатацию, последующего использования и, при необходимости, завершения срока его службы. В современной строительной практике успех проекта определяется

не только качеством проектных решений или уровнем строительных технологий, но и тем, насколько грамотно выстроены все этапы подготовки и сопровождения объекта. Именно поэтому комплексный анализ жизненного цикла здания имеет важное теоретическое и практическое значение.

Инвестиционно-строительный проект начинается с формирования инвестиционного замысла. На этой стадии определяется необходимость строительства, анализируется потенциальный спрос, оцениваются финансовые и градостроительные ограничения, а также формируется предварительное представление о будущем объекте. Уже на этом этапе возникает вопрос о выборе земельного участка, поскольку именно площадка во многом определяет экономику проекта. Местоположение, транспортная доступность, наличие инженерных сетей, геологические условия, конфигурация участка и градостроительные регламенты оказывают прямое влияние на стоимость строительства, сроки реализации и эксплуатационные характеристики будущего объекта. Ошибка на стадии выбора участка может привести к значительным дополнительным затратам, связанным с усилением грунтов, подведением коммуникаций, корректировкой проектных решений и даже изменением функционального назначения здания.

Не менее важным этапом является оформление прав на землю. Застройщик должен иметь законные основания для использования участка, поскольку без правоустанавливающих документов дальнейшее проектирование и строительство невозможны. Земельное законодательство предусматривает различные формы владения и пользования землёй: право собственности, аренду, безвозмездное пользование, постоянное бессрочное пользование и иные правовые конструкции. На практике именно аренда и собственность наиболее часто используются для реализации инвестиционно-строительных проектов. Процедура предоставления земельного участка может происходить как через торги, так и без их проведения — в зависимости от правового статуса земли, целей использования и наличия предусмотренных законом оснований. Если участок ещё не сформирован, требуется разработка схемы его расположения, проведение кадастровых работ, постановка на кадастровый учёт и последующая регистрация права.

Существенную роль играют градостроительные документы, прежде всего документация по планировке территории. Проект планировки территории и проект межевания территории обеспечивают пространственную и правовую основу будущей застройки. Первый документ задаёт общую организацию территории: определяет элементы планировочной структуры, размещение объектов капитального строительства, границы красных линий, транспортную и инженерную инфраструктуру.

Второй документ конкретизирует границы земельных участков, их площадь, местоположение и правовой режим. Эти документы являются не только инструментами градостроительного регулирования, но и важными основаниями для дальнейшего проектирования, получения разрешений и реализации строительного проекта. В условиях современной комплексной застройки именно качество планировочных решений во многом определяет удобство будущей эксплуатации территории и её инвестиционную привлекательность.

Следующим этапом является подготовка исходно-разрешительной документации. В неё входят градостроительный план земельного участка, технические условия на подключение к инженерным сетям, результаты инженерных изысканий, а также иные документы, необходимые для проектирования. Градостроительный план земельного участка содержит сведения об ограничениях, параметрах разрешённого строительства, зонах с особыми условиями использования территории и иных требованиях, которые необходимо учитывать при разработке проекта. Инженерные изыскания позволяют получить сведения о природных и техногенных условиях площадки, оценить геологические, гидрологические, геодезические и экологические характеристики участка. Без этих данных невозможно обеспечить надёжность, безопасность и экономическую обоснованность проектных решений.

Проектная документация занимает центральное место в структуре строительного проекта. Именно на её основе определяется архитектурный облик объекта, конструктивные решения, состав инженерных систем, организация строительства и мероприятия по обеспечению безопасности. Структура проектной документации включает пояснительную записку, схему планировочной организации земельного участка, архитектурные и конструктивные решения, сведения об инженерном оборудовании, проект организации строительства, разделы по охране окружающей среды, пожарной безопасности, обеспечению доступа маломобильных групп населения и другие обязательные разделы. В условиях цифровизации строительной отрасли всё более важную роль приобретает BIM-моделирование, позволяющее интегрировать в единое информационное пространство архитектурные, конструктивные и инженерные решения. Использование BIM-технологий повышает точность проектирования, помогает выявлять коллизии на ранних стадиях и способствует снижению затрат и сроков реализации проекта.

Перед началом строительства проектная документация, как правило, подлежит экспертизе. Экспертиза может быть государственной или негосударственной, а её основная задача заключается в проверке соответствия проектных решений требованиям технических регламентов, строительных норм, экологических, пожарных

и санитарных требований. В ряде случаев экспертиза не требуется, например для некоторых индивидуальных жилых домов или объектов с небольшой этажностью и площадью, если они не финансируются из бюджета. После положительного заключения экспертизы разрабатывается рабочая документация. В отличие от проектной, она содержит детализированные материалы, необходимые непосредственно для выполнения строительно-монтажных работ. Именно рабочая документация обеспечивает переход от проектного замысла к практической реализации объекта на строительной площадке.

Особое значение имеет получение разрешения на строительство. Этот документ подтверждает, что проект соответствует градостроительным требованиям и может быть реализован на конкретном земельном участке. Для его получения застройщик предоставляет правоустанавливающие документы на землю, градостроительный план, результаты инженерных изысканий, проектную документацию, положительное заключение экспертизы и иные предусмотренные законом материалы. Без разрешения на строительство начало работ недопустимо.

После получения разрешения на строительство начинается этап непосредственного выполнения работ. Перед стартом строительно-монтажных мероприятий застройщик обязан направить извещение о начале строительства в орган государственного строительного надзора. Далее объект находится под несколькими видами контроля: строительным, авторским, государственным, административным и внутренним надзором заказчика. Такая многоуровневая система необходима для обеспечения качества строительства, соблюдения технологии работ и своевременного выявления нарушений. Во время строительства ведется исполнительная документация. Она фиксирует фактическое выполнение работ, скрытые операции, изменения проектных решений и результаты промежуточных проверок. К исполнительной документации относятся журналы работ, акты освидетельствования, исполнительные схемы, акты выполненных работ и другие формы, подтверждающие реальное состояние объекта на каждом этапе строительства.

После завершения строительства наступает стадия ввода объекта в эксплуатацию. Она включает приемку объекта, проведение проверок органами строительного надзора, оформление заключения о соответствии и получение разрешения на ввод в эксплуатацию. Только после выполнения этих процедур объект приобретает полноценный статус недвижимого имущества, готового к использованию по назначению. Ввод в эксплуатацию завершает строительную фазу жизненного цикла, но не завершает существование объекта как такового, поскольку далее начинается этап эксплуатации.

Эксплуатация объекта недвижимости предполагает его использование по назначению, техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт, а также управление объектом. На этой стадии особенно важны контроль технического состояния конструкций и инженерных систем, соблюдение требований безопасности и своевременное проведение ремонтных мероприятий. Эксплуатационная стадия часто длится значительно дольше, чем строительство, поэтому именно здесь проявляется качество принятых ранее решений. Если здание было неправильно спроектировано, построено с нарушениями или без учёта перспектив эксплуатации, это приводит к росту эксплуатационных расходов и снижению эффективности использования объекта.

Завершающая стадия жизненного цикла связана с физическим и моральным износом объекта, снижением его функциональной пригодности и принятием решения о прекращении эксплуатации. В этом случае может осуществляться демонтаж, снос, реконструкция или иное преобразование имущественного комплекса. Ликвидация объекта требует предварительного обследования, проектирования работ по демонтажу, отключения инженерных сетей, соблюдения требований безопасности и обращения с отходами.

Таким образом, жизненный цикл инвестиционно-строительного проекта представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов, в которой каждая стадия оказывает влияние на последующие. Успешная реализация проекта невозможна без качественного выбора земельного участка, грамотного оформления прав, точной градостроительной и проектной подготовки, прохождения экспертизы, соблюдения строительных процедур, надлежащего ввода объекта в эксплуатацию и последующего эффективного управления недвижимостью. Комплексный подход к жизненному циклу объекта позволяет снизить риски, повысить качество строительства, обеспечить устойчивость проекта и создать объект недвижимости, соответствующий современным требованиям экономики, безопасности и комфорта.

References

1. Urban Planning Code of the Russian Federation No. 190-FZ dated December 29, 2004.
2. Land Code of the Russian Federation No. 136-FZ dated 25.10.2001
3. Investment management: in 2 volumes / V. V. Sheremet, V. M. Pavlyuchenko, V. D. Shapiro et al. Moscow : Higher School, 1998. Shapiro V. D. and others.
4. Project management: a textbook for universities / V. D. Shapiro et al. St. Petersburg : DvaTrl, 1996.
5. Zarenkov V. A. Project management //Association of Construction Universities, 2010 – 312 p.

UDC 004.056.53

Zaeva M.A., Kurginyan E.A., Guliyev T.A. Methodology of proactive threat hunting for identifying compromise artifacts during zero-day attacks in corporate infrastructure

Методология проактивного поиска угроз для выявления артефактов компрометации при атаках нулевого дня в корпоративной инфраструктуре

Zaeva Margarita Anatolyevna,

Associate Professor of the Department of Computer Systems and Technologies, Institute of Intelligent Cybernetic Systems, National Research University MEPhI, Moscow

Kurginyan Ella Arshakovna,

Senior Lecturer, Department of Computer Systems and Technologies, Institute of Intelligent Cybernetic Systems, National Research University MEPhI, Moscow

Guliyev Tarlan Arif ogly,

Master's student, National Research University MEPhI, Moscow

Заева Маргарита Анатольевна,

доцент кафедры компьютерных систем и технологий института интеллектуальных кибернетических систем, Национальный исследовательский университет «МИФИ»,

г. Москва

Кургинян Элла Аршаковна,

старший преподаватель кафедры компьютерных систем и технологий института интеллектуальных кибернетических систем, Национальный исследовательский университет «МИФИ», г. Москва

Гулиев Тарлан Ариф оглы,

магистрант кафедры компьютерных систем и технологий института интеллектуальных кибернетических систем, Национальный исследовательский университет «МИФИ»,

г. Москва

Abstract. *The article investigates the challenges of detecting zero-day attacks in corporate networks. The inefficiency of traditional signature analysis during the early stages of targeted cyberattacks is substantiated. As a solution, transitioning to the "Assume Breach" paradigm and implementing proactive Threat Hunting are proposed. The primary focus is placed on behavioral analysis and anomaly detection during the post-exploitation phase. Hidden attack vectors are investigated, including the use of legitimate binaries (LOLBins) and memory injections. The methodological framework relies on a hypothesis-driven approach utilizing the TaHiTI and PEAK frameworks. In the practical section, the hunting process is meticulously modeled within a Windows Server and Active Directory infrastructure. The integration of Sysmon telemetry with the ELK analytical stack is demonstrated. Specific KQL queries are developed to capture lsass.exe memory dumping and remote thread creation. It is proven that the proposed approach radically reduces the attacker's dwell time and minimizes potential damage.*

Keywords: *cybersecurity, zero-day attacks, proactive threat hunting, behavioral analysis, compromise artifacts, LOLBins, Sysmon, ELK stack.*

Аннотация. В статье исследуется проблематика выявления атак нулевого дня (Zero-Day) в корпоративных сетях. Обоснована неэффективность традиционного сигнатурного анализа на ранних стадиях целевых кибератак. В качестве решения предлагается переход к концепции «допущения компрометации» (Assume Breach) и внедрение проактивного поиска угроз (Threat Hunting). Главный акцент сделан на поведенческом анализе и детектировании аномалий на этапе пост-эксплуатации. Исследованы скрытые векторы атак, включая использование легитимных утилит (LOLBins) и инъекции в память. Методологическая база опирается на гипотезный подход с применением фреймворков TaHiTI и PEAK. В практической части детально смоделирован

процесс хантинга в инфраструктуре Windows Server и Active Directory. Продемонстрировано использование телеметрии Sysmon в связке с аналитическим стеком ELK. Разработаны специфические KQL-запросы для фиксации дампинга памяти lsass.exe и создания удаленных потоков. Доказано, что предложенный подход радикально сокращает время скрытого присутствия атакующего (Dwell Time) и минимизирует ущерб.

***Ключевые слова:** кибербезопасность, атаки нулевого дня, проактивный поиск угроз, поведенческий анализ, артефакты компрометации, LOLBins, Sysmon, ELK-стек.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Современный ландшафт кибернетических угроз характеризуется беспрецедентным ростом технологической сложности и скрытности целевых атак. Вектор применения эксплойтов нулевого дня (Zero-Day) перестал быть прерогативой исключительно правительственных хакерских группировок (Advanced Persistent Threats, APT) и активно адаптируется высококвалифицированными финансово мотивированными преступными синдикатами, в том числе операторами программ-вымогателей (Ransomware-as-a-Service). Анализ глобальных инцидентов информационной безопасности показывает, что количество выявленных уязвимостей нулевого дня, активно эксплуатируемых в корпоративной среде (in-the-wild), сохраняется на критически высоком уровне. При этом фокус атакующих стремительно смещается от пользовательских клиентских приложений в сторону корпоративных пограничных устройств, систем управления ИТ-инфраструктурой и корпоративного программного обеспечения [1].

Классическая архитектура защиты периметра, опирающаяся на реактивные средства безопасности, такие как системы предотвращения вторжений (IPS), антивирусное программное обеспечение следующего поколения (NGAV) и сигнатурные модули EDR, демонстрирует существенные ограничения при столкновении с ранее неизвестными уязвимостями. Сигнатурный анализ, являющийся ядром большинства традиционных систем обнаружения, технологически требует наличия предварительно известного паттерна: криптографического хеша файла, специфической последовательности байтов в сетевом пакете или скомпрометированного домена управления (C2). При атаке нулевого дня такой индикатор компрометации (Indicator of Compromise, IoC) отсутствует априори. Это позволяет злоумышленнику беспрепятственно преодолеть первый эшелон обороны, не генерируя предупреждений в системах мониторинга.

В результате успешного первоначального проникновения время скрытого присутствия атакующего в скомпрометированной сети (Dwell Time) может составлять недели, а в случае сложных APT-атак — месяцы. В течение этого периода

злоумышленники осуществляют внутреннюю разведку сети, горизонтальное продвижение (Lateral Movement), повышение привилегий и эксфильтрацию конфиденциальных данных. В условиях, когда предотвратить первичный вектор атаки технологически невозможно из-за неизвестности уязвимости, критическое значение приобретает способность Центра мониторинга информационной безопасности (Security Operations Center, SOC) выявлять присутствие нарушителя на ранних стадиях пост-эксплуатации. Данную стратегическую задачу призвана решать методология проактивного поиска угроз — Threat Hunting (TH) [3].

Проактивный поиск угроз представляет собой итеративный, интеллектуальный и глубоко аналитический процесс выявления скрытой активности внутри ИТ-инфраструктуры, которая успешно обошла существующие автоматизированные средства контроля. Фундаментальным принципом этой дисциплины выступает парадигма «допущения компрометации» (Assume Breach). Данный подход постулирует, что инфраструктура уже может быть скомпрометирована, а задача аналитика заключается не в ожидании срабатывания системы оповещения, а в целенаправленном поиске следов злоумышленника.

Процесс поиска угроз неразрывно связан с трансформацией роли аналитика SOC. Современные центры мониторинга сталкиваются с серьезными внутренними вызовами, требующими методологического пересмотра. В частности, феномен «усталости от оповещений» (Alert Fatigue), вызванный колоссальным объемом ложноположительных срабатываний (False Positives), снижает бдительность специалистов и ведет к профессиональному выгоранию. Изолированность данных (Silos), когда SIEM, антивирус и межсетевой экран не интегрированы должным образом, вынуждает аналитика тратить критически важное время на ручное сопоставление событий.

Для нивелирования этих слабых сторон методология Threat Hunting интегрируется с передовыми решениями класса SOAR (Security Orchestration, Automation, and Response) и технологиями машинного обучения (ML) [1]. Использование алгоритмов поведенческого анализа пользователей и сущностей (UEBA) позволяет отфильтровать легитимный «шум» и предоставить аналитику контекстуализированные данные для проверки гипотез, повышая точность выявления ранее неизвестных угроз и аномалий, характерных для атак нулевого дня.

Эффективный Threat Hunting исключает хаотичный перебор журналов событий. Процесс строго структурирован и базируется на проверке предварительно сформулированных гипотез. Данный подход формализован в таких академических и промышленных фреймворках, как PEAK (Prepare, Execute, Act with Knowledge) и TaHiTI

(Targeted Hunting integrating Threat Intelligence) [4; 5]. Фреймворк PEAK, например, выделяет три типа хантинга: основанный на гипотезах (Hypothesis-Driven), основанный на анализе базовых линий поведения (Baseline/EDA) и хантинг с использованием машинного обучения (Model-Assisted).

Гипотеза для поиска угроз формулируется путем синтеза данных киберразведки (Cyber Threat Intelligence), понимания архитектуры собственной корпоративной сети и детализации тактик, техник и процедур (TTPs) в соответствии с матрицей MITRE ATT&CK. В контексте атак нулевого дня гипотеза опирается на аксиому: независимо от технической реализации нулевого эксплойта, для достижения конечных целей атакующий неизбежно будет применять известные техники пост-эксплуатации, оставляя поведенческие артефакты .

Одной из главных проблем при обнаружении пост-эксплуатации является массовое применение злоумышленниками тактики Living off the Land (LotL). Данная концепция предполагает использование легитимных, встроенных в операционную систему утилит и бинарных файлов (Living off the Land Binaries, LOLBins) для обхода систем защиты и выполнения вредоносных действий . Классическими примерами LOLBins в среде Windows являются интерпретатор powershell.exe, утилита инструментария управления wmic.exe, средство работы с сертификатами certutil.exe и исполняемый файл rundll32.exe.

Поскольку данные компоненты имеют валидные цифровые подписи (например, от Microsoft) и повседневно используются легитимными администраторами для обслуживания инфраструктуры, традиционные антивирусные агенты редко блокируют их работу во избежание сбоев в бизнес-процессах. Атака нулевого дня, бесшовно перетекающая в фазу использования LOLBins (например, загрузка полезной нагрузки через certutil.exe -urlcache -split -f), становится невидимой для реактивных средств защиты.

Именно поэтому Threat Hunting фокусируется на глубоком поведенческом анализе. Перед аналитиком стоит задача не категоризации файла как вредоносного, а оценки аномальности контекста его вызова. В Таблице 1 приведена матрица, демонстрирующая трансформацию тактик атакующего в проверяемые гипотезы для хантинга.

Таблица 1.

Концептуальная матрица гипотез проактивного поиска угроз

Тактика (MITRE АТТ&СК)	Цель атакующего (Пост-эксплуатации)	Поведенческий маркер (Аномалия)	Пример проверяемой гипотезы для аналитика SOC
Execution (Выполнение)	Бесфайловый (Fileless) запуск полезной нагрузки	Вызов командных интерпретаторов нетипичными родителями	Серверный процесс (например, w3wp.exe) порождает cmd.exe/powershell.exe с Base64-аргументами
Persistence (Закрепление)	Сохранение скрытого доступа после перезагрузки узла	Модификация конфигурации служб или реестра нестандартными процессами	Скриптовые движки иницируют создание задач (schtasks.exe) или служб (sc.exe)
Credential Access (Сбор учетных данных)	Извлечение хешей паролей и Kerberos-билетов из памяти	Несанкционированное чтение адресного пространства lsass.exe	Нелегитимные процессы запрашивают высокопривилегированный доступ к дескриптору lsass.exe
Lateral Movement (Продвижение)	Горизонтальное распространение по корпоративному домену	Аномальные паттерны использования легитимных протоколов (SMB, WMI, RDP)	Массовые запросы wmic.exe или RDP между рабочими станциями, минуя серверный сегмент

Как видно из Таблицы 1, каждая гипотеза строится вокруг поведенческого отклонения (аномалии), которое невозможно скрыть без нарушения функциональности самого эксплойта или вредоносного фреймворка. Сбор и анализ доказательной базы для этих гипотез требует применения специализированного инструментария.

Для демонстрации прикладного применения методологии Threat Hunting рассмотрим сценарий выявления артефактов пост-эксплуатации после гипотетического успешного компрометации периметра через уязвимость нулевого дня. Моделирование проводится в стандартной корпоративной инфраструктуре на базе серверных операционных систем Windows Server под управлением службы каталогов Active Directory (AD).

Журналы безопасности ОС Windows Security Event Logs (даже при включенном аудите создания процессов с Event ID 4688) часто не обеспечивают достаточного уровня детализации для выявления инъекций кода в оперативную память или детального аудита сетевой активности конкретных процессов. Для восполнения этого слепого пятна в архитектуре SOC используется компонент Microsoft Sysmon (System Monitor). Sysmon

устанавливается как фоновый системный сервис и драйвер режима ядра, позволяя фиксировать расширенные атрибуты событий: криптографические хеши исполняемых файлов, полную командную строку, сетевые подключения и факты манипуляций с памятью других процессов.

Сбор, парсинг и агрегация телеметрии Sysmon со всех узлов домена осуществляется с помощью аналитического стека ELK (Elasticsearch, Logstash, Kibana). В качестве легковесного агента доставки логов применяется Winlogbeat. В среде Kibana аналитики используют язык запросов KQL (Kusto Query Language или Kibana Query Language, в зависимости от применяемого аналитического движка SIEM) для фильтрации гигантских массивов данных и проверки выдвинутых гипотез [3].

Основополагающие идентификаторы событий Sysmon, используемые для выявления пост-эксплуатационной активности, систематизированы в Таблице 2.

Таблица 2.

Критичные события Sysmon для выявления пост-эксплуатации

ID события Sysmon	Название события (Категория)	Практическая ценность для проактивного поиска угроз
1	Process Creation (Создание процесса)	Фиксация полной командной строки, включая обфусцированные параметры. Анализ иерархии процессов для выявления нелегитимного использования LOLBins.
3	Network Connection (Сетевое подключение)	Связывание сетевой активности с конкретными бинарными файлами. Обнаружение C2-коммуникаций (Beaconing) и горизонтального продвижения внутри AD.
8	CreateRemoteThread (Создание удаленного потока)	Главный индикатор техники инъекции кода (Process Injection / Process Hollowing). Фиксирует внедрение вредоносного потока в легитимный процесс.
10	ProcessAccess (Доступ к процессу)	Журналирование попыток одного процесса открыть дескриптор другого. Критически важно для выявления кражи учетных данных (дамп памяти).
11	FileCreate (Создание файла)	Обнаружение создания исполняемых файлов в системных директориях, временных папках или создания дампов памяти на жестком диске.
22	DNS Query (DNS-запрос)	Мониторинг запросов к доменным именам на уровне процессов. Позволяет выявлять алгоритмы генерации доменов (DGA) и эксфильтрацию данных.

Сценарий 1: Выявление дампа учетных данных (LSASS Abuse)

Одной из первоочередных целей злоумышленника в среде Active Directory является кража учетных данных операционной системы. Извлечение NTLM-хешей или

билетов Kerberos из памяти процесса подсистемы локальной безопасности (LSASS) позволяет осуществить продвижение с использованием техник Pass-the-Hash или Overpass-the-Hash.

После первоначального проникновения через 0-day эксплойт злоумышленник может использовать для создания дампа памяти LSASS модифицированные версии утилиты Mimikatz, инструмент ProcDump или злоупотребить встроенной библиотекой comsvcs.dll (LOLBin) . В любом из этих случаев вредоносный процесс обязан открыть дескриптор (handle) процесса lsass.exe с высокими привилегиями, что зафиксирует Sysmon как событие с ID 10 (ProcessAccess).

Аналитик SOC формулирует гипотезу и формирует KQL-запрос для выявления аномальных запросов доступа (например, с масками прав 0x1010, 0x1410 или 0x1ffff — PROCESS_ALL_ACCESS). Пример аналитического запроса представлен ниже:

```
SysmonEvents
| where EventID == 10
| where TargetImage endswith "\\lsass.exe"
| where GrantedAccess in ("0x1010", "0x1410", "0x1ffff", "0x143a", "0x0040")
| where SourceImage!endswith "\\csrss.exe"
  and SourceImage!endswith "\\svchost.exe"
  and SourceImage!endswith "\\MsMpEng.exe"
| project Timestamp, ComputerName, SourceImage, SourceProcessId, TargetImage,
GrantedAccess, CallTrace
| sort by Timestamp desc
```

Данный фильтр исключает легитимный системный «шум» (обращения от антивируса Защитника Windows MsMpEng.exe или подсистемы клиент-сервер csrss.exe). Оставшиеся события представляют собой аномалии. Изучение поля CallTrace позволит аналитику выявить использование специфических API-вызовов (например, из библиотек dbgcore.dll или dbghelp.dll), характерных для создания минидампов памяти.

Сценарий 2: Выявление инъекции кода (Process Injection)

Второй распространенный паттерн атак нулевого дня — маскировка вредоносного кода внутри адресного пространства доверенных приложений (техники Process Hollowing или DLL Injection). Если 0-day эксплойт используется для доставки бесфайлового бекдора, злоумышленник попытается скрыть его выполнение, внедрив в процессы explorer.exe или svchost.exe.

Надежным методом выявления данной активности является аудит создания удаленных потоков (Sysmon Event ID 8). Соответствующий запрос для ELK может выглядеть следующим образом:

SysmonEvents

```
| where EventID == 8  
| where TargetImage in~ ("*\explorer.exe", "*\svchost.exe", "*\winlogon.exe",  
"*\notepad.exe")  
| where SourceImage!in~ ("*\csrss.exe", "*\lsass.exe", "*\services.exe", "*\provtool.exe")  
| project Timestamp, ComputerName, SourceImage, TargetImage, StartFunction,  
StartAddress
```

Этот фильтр высвечивает события, когда несистемный (потенциально вредоносный) процесс пытается запустить поток выполнения в памяти критического системного сервиса. Фиксация подобного артефакта является стопроцентным индикатором компрометации (IoC), свидетельствующим о наличии активного злоумышленника в корпоративной сети, что требует немедленного запуска процедуры реагирования на инцидент (Incident Response). В сочетании с анализом использования таких утилит, как ntdsutl.exe (которая часто применяется злоумышленниками для создания резервной копии базы данных Active Directory NTDS.dit), аналитик способен реконструировать всю цепочку действий атакующего.

Эволюция киберугроз и широкая доступность эксплойтов нулевого дня на теневом рынке делают неизбежными ситуации, когда периметральная защита и классический сигнатурный анализ оказываются технологически бессильны на этапе первоначального вектора атаки. В этих реалиях методология проактивного поиска угроз (Threat Hunting) трансформируется из опциональной практики передовых корпораций в критически необходимый и безальтернативный элемент обеспечения устойчивости ИТ-инфраструктуры.

Смещение парадигмы безопасности от поиска статических индикаторов компрометации (хешей, IP-адресов) к глубокому анализу поведенческих паттернов, тактик и процедур злоумышленника (TTPs) позволяет выявлять успешные атаки вне зависимости от новизны примененного эксплойта. Проведенное в статье моделирование доказывает, что агрегация низкоуровневой системной телеметрии с помощью инструментов класса Sysmon и применение структурированных аналитических KQL-запросов в среде ELK делают пост-эксплуатационную активность (использование легитимных LOLBins, дампинг памяти, инъекции кода) прозрачной для аналитиков SOC.

Систематизация процессов Threat Hunting на базе фреймворков PEAK и TaHiTI позволяет радикально сократить время скрытого присутствия атакующего (Dwell Time) в скомпрометированной сети. Своевременная идентификация артефактов на стадиях закрепления (Persistence) и горизонтального продвижения (Lateral Movement)

предоставляет службе ИБ временное окно для разрыва цепочки атаки (Cyber Kill Chain) до того момента, как злоумышленник успеет реализовать деструктивные воздействия, тем самым гарантируя минимизацию операционного, финансового и репутационного ущерба для организации.

References

1. Ahmad, R., Alsmadi, I., Alhamdani, W., Tawalbeh, L. (2023). Zero-day attack detection: a systematic literature review. *Artificial Intelligence Review*, pp. 1-79.
2. Charrier, C., Sadowski, J., Lecigne, C., Stolyarov, V. (2025). Hello 0-Days, My Old Friend: A 2024 Zero-Day Exploitation Analysis. *Google Threat Intelligence*.
3. Dhanushkodi, K., Thejas, S. (2024). AI Enabled Threat Detection: Leveraging Artificial Intelligence for Advanced Security and Cyber Threat Mitigation. *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 1-20.
4. TaHiTI - Targeted Hunting integrating Threat Intelligence. *Threat Hunting Methodology whitepaper*. (2018). Betaalvereniging Nederland, 24 p.
5. The PEAK Threat Hunting Framework. (2023). *Splunk SURGe*.
6. Detecting and preventing LSASS credential dumping attacks. (2022). *Microsoft Security Blog*.

UDC 621.634

Zhukov D.S. Development of a special design of an eccentric mandrel

Разработка конструкции специальной эксцентричной оправки.

Zhukov Denis Sergeevich

Master's student,
Voronezh State Technical University

Scientific supervisor: **Krasnova M.N.**,
PhD, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State
Technical University Жуков Денис Сергеевич

Магистрант,
Воронежский государственный технический университет
Научный руководитель: Краснова М.Н.
к. т. н, доцент кафедры технологии машиностроения,
Воронежский государственный технический университет

***Abstract.** The developed special eccentric mandrel is designed for turning and the requirements for the working conditions of the structure are determined.*

***Keywords:** eccentric mandrel, turning, technological tooling, strength calculation, finite element analysis*

***Аннотация.** Разработанная специальная эксцентричная оправка предназначена для токарной обработки и определены требования к условиям работоспособности конструкции.*

***Ключевые слова:** эксцентричная оправка, токарная обработка, технологическая оснастка, прочностной расчёт, конечно-элементный анализ*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Специальная эксцентричная оправка представляет собой технологическое приспособление, предназначенное для установки, базирования и закрепления заготовки при выполнении токарной обработки деталей, имеющих поверхности со смещённой осью вращения.

Необходимость применения подобных оправок возникает при обработке деталей сложной геометрической формы, у которых отдельные поверхности расположены под углом либо смещены относительно основной оси детали. Использование стандартных цилиндрических оправок в таких случаях не обеспечивает требуемого положения заготовки, что приводит к увеличению количества установов, усложнению технологического процесса и снижению точности обработки.

Разработанная специальная эксцентричная оправка предназначена для токарной обработки детали типа «Ось» и обеспечивает установку заготовки под углом относительно основной оси вращения шпинделя станка. Конструкция оправки

позволяет выполнять обработку поверхностей со смещённой геометрической осью без применения дополнительных установов и повторной переустановки детали.

Использование специальной оправки позволяет:

- повысить точность взаимного расположения поверхностей;
- уменьшить погрешность базирования;
- сократить вспомогательное время обработки;
- повысить повторяемость установки заготовки;
- снизить количество технологических переходов;
- повысить стабильность положения детали при обработке.

Особенно эффективным применение эксцентричных оправок является в условиях мелкосерийного и серийного производства, где требуется обеспечение высокой точности обработки при сравнительно небольшой трудоёмкости изготовления технологической оснастки.

Конструктивно оправка представляет собой цилиндрический корпус со смещённым посадочным отверстием под установку заготовки. В конструкции предусмотрены элементы базирования и закрепления, обеспечивающие надёжную работу оправки под действием статических и динамических нагрузок, возникающих в процессе токарной обработки.

Основными элементами конструкции являются:

- корпус оправки;
- посадочное отверстие $\varnothing 40,05H8$;
- наклонно расположенная ось установки заготовки;
- фиксирующий болт $M8 \times 1,25 \times 40$;
- прижимной болт $M10 \times 1,5 \times 30$;
- наружные цилиндрические поверхности корпуса;
- отверстия под крепёжные элементы.

Конструкция оправки разработана таким образом, чтобы обеспечить:

- достаточную жёсткость;
- минимальные деформации при обработке;
- устойчивость к вибрациям;
- надёжную передачу сил резания;
- стабильность положения заготовки.

Корпус оправки является основным несущим элементом конструкции. Он предназначен для восприятия механических нагрузок, возникающих в процессе обработки, а также для передачи крутящего момента и обеспечения общей жёсткости приспособления.

Наружный диаметр корпуса составляет $\varnothing 80$ мм, диаметр внутренней ступени — $\varnothing 70$ мм, а общая длина оправки равна 95 мм.

Корпус имеет цилиндрическую форму со ступенчатыми переходами и фасками $5 \times 45^\circ$, обеспечивающими:

- снижение концентрации напряжений;
- повышение технологичности изготовления;
- уменьшение вероятности повреждения кромок;
- удобство монтажа и установки.

Увеличенный наружный диаметр корпуса выбран для повышения жёсткости конструкции. В процессе токарной обработки корпус воспринимает:

- силы резания;
- контактные напряжения;
- изгибающие нагрузки;
- крутящий момент;
- динамические нагрузки от неравномерного распределения массы.

Массивность корпуса позволяет уменьшить влияние вибраций и снизить деформации при работе оправки на повышенных оборотах.

Для изготовления оправки принята конструкционная легированная сталь 40Х.

Выбор данного материала обусловлен необходимостью обеспечения:

- высокой прочности;
- достаточной жёсткости;
- устойчивости к динамическим нагрузкам;
- хорошей износостойкости;
- возможности термической обработки;
- стабильности геометрических параметров при эксплуатации.

Сталь 40Х широко применяется при изготовлении технологической оснастки, валов, оправок и других деталей, работающих в условиях переменных нагрузок и повышенных механических напряжений.

К основным преимуществам стали 40Х относятся:

- высокий предел прочности;
- хорошая сопротивляемость усталостным разрушениям;
- высокая прокаливаемость;
- хорошая обрабатываемость резанием;
- возможность получения высокой твёрдости после термообработки.

Использование стали 40Х обеспечивает достаточный запас прочности оправки при работе в условиях токарной обработки.

В центральной части оправки выполнено посадочное отверстие $\varnothing 40,05H8$ с шероховатостью поверхности Ra 1,6.

Посадочное отверстие является основной базирующей поверхностью оправки и предназначено для установки заготовки детали.

Точность отверстия по качеству H8 обеспечивает:

- высокую точность установки заготовки;
- минимальное радиальное биение;
- стабильность положения детали;
- снижение погрешности базирования.

Шероховатость поверхности Ra 1,6 выбрана для повышения контактной жёсткости соединения между оправкой и заготовкой. Снижение шероховатости позволяет:

- уменьшить микроперемещения детали;
- повысить стабильность закрепления;
- улучшить распределение контактных напряжений.

Кроме того, наличие минимального гарантированного зазора между заготовкой и отверстием обеспечивает удобство установки детали и предотвращает заклинивание при монтаже.

Главной особенностью оправки является наклонное расположение оси посадочного отверстия относительно основной оси корпуса. Угол смещения составляет $5^{\circ}45'$.

Наличие углового смещения позволяет обеспечивать эксцентричное расположение заготовки относительно оси вращения шпинделя станка.

Такое конструктивное решение даёт возможность:

- выполнять обработку поверхностей со смещённой осью;
- исключить необходимость дополнительных установок;
- уменьшить погрешности переустановки;
- повысить точность взаимного расположения поверхностей детали.

Однако наличие смещённой оси значительно усложняет работу оправки с точки зрения механики и динамики.

При вращении оправки возникают:

- дополнительные изгибающие моменты;
- динамический дисбаланс;
- центробежные нагрузки;
- вибрации;
- неравномерное распределение напряжений.

Поэтому эксцентричная оправка работает в более сложных условиях по сравнению

с обычными цилиндрическими оправками.

Для закрепления заготовки в конструкции предусмотрены два крепёжных элемента:

- болт М8×1,25×40;
- болт М10×1,5×30.

Каждый из болтов выполняет собственную функцию в общей системе закрепления заготовки.

Болт М8×1,25×40

Болт М8 используется для фиксации положения заготовки и ограничения её осевого перемещения относительно корпуса оправки.

Основными функциями болта являются:

- фиксация положения детали;
- предотвращение осевого смещения;
- обеспечение стабильности установки;
- участие в базировании заготовки.

Во время обработки болт воспринимает нагрузки, возникающие под действием:

- осевых составляющих силы резания;
- вибраций;
- динамических колебаний;
- неравномерного распределения нагрузок.

Таким образом, болт М8 является не только фиксирующим, но и одним из базирующих элементов конструкции оправки.

Болт М10×1,5×30

Болт М10 выполняет функцию основного прижимного элемента конструкции.

Он обеспечивает:

- создание силы прижима;
- увеличение силы трения между заготовкой и оправкой;
- предотвращение проворота детали;
- повышение жёсткости соединения.

Во время токарной обработки болт М10 воспринимает основные нагрузки, связанные с передачей крутящего момента от сил резания.

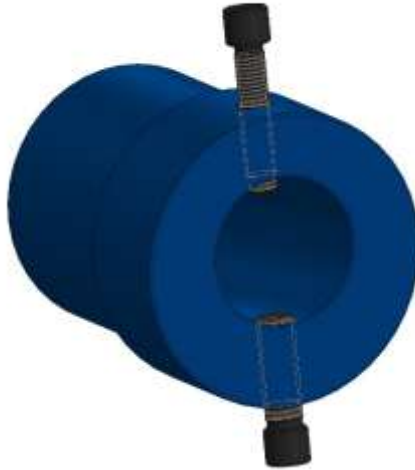


Рисунок 1. Эксцентричная оправка 3D модель

Надёжность работы всей оправки в значительной степени зависит от правильного выбора усилия затяжки данного болта, так как недостаточная сила прижима может привести к провороту заготовки, возникновению вибраций и снижению точности обработки.

Работа оправки под нагрузкой

Во время токарной обработки оправка работает в условиях сложного напряжённого состояния.

На конструкцию воздействуют:

- силы резания;
- силы закрепления;
- контактные напряжения;
- крутящий момент;
- изгибающие нагрузки;
- динамические силы;
- вибрационные нагрузки.

Из-за наличия углового смещения оси распределение нагрузок по конструкции является несимметричным, что приводит к возникновению локальных зон повышенных напряжений.

Наиболее нагруженными участками конструкции являются:

- область посадочного отверстия $\varnothing 40,05H8$;
- отверстия под крепёжные болты;

- участок минимальной толщины стенки;
- область смещения оси отверстия.

Особенности работы эксцентричной оправки

По сравнению с обычными цилиндрическими оправками эксцентричная конструкция обладает рядом особенностей:

- смещённый центр масс;
- повышенная чувствительность к вибрациям;
- наличие динамического дисбаланса;
- сложное распределение напряжений;
- повышенные требования к жёсткости конструкции.

Эти особенности требуют проведения:

- прочностных расчётов;
- анализа напряжённо-деформированного состояния;
- расчёта болтовых соединений;
- исследования динамических нагрузок;
- моделирования работы оправки под нагрузкой.

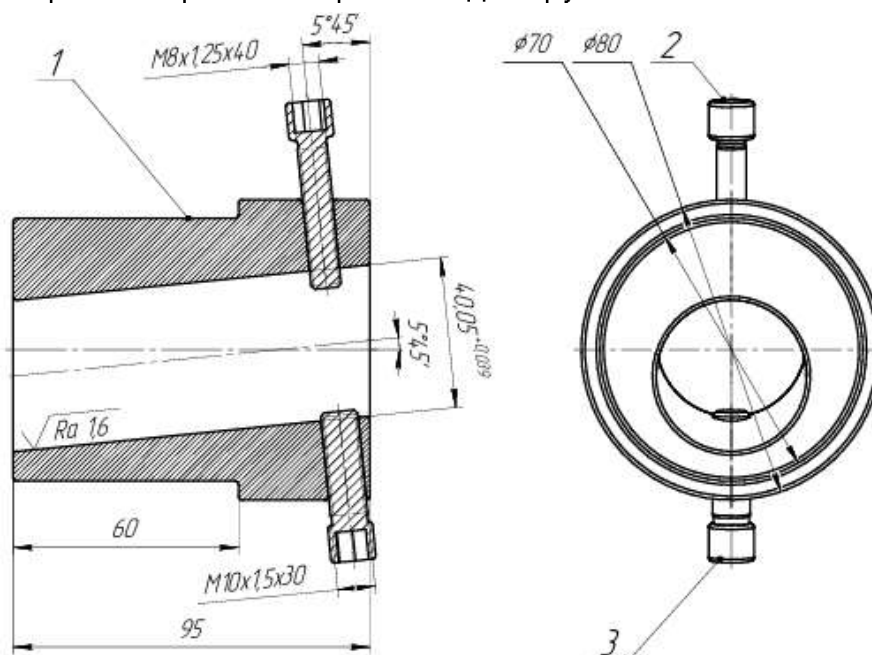


Рисунок 2. Эксцентричная оправка сборочный чертёж

Вывод по конструкции оправки

Разработанная специальная эксцентричная оправка представляет собой сложное технологическое приспособление, предназначенное для токарной обработки деталей со смещённой осью вращения.

Конструкция оправки обеспечивает:

- точное базирование заготовки;
- надёжное закрепление детали;
- передачу сил резания;
- устойчивую работу при статических и динамических нагрузках.

Основной особенностью конструкции является наклонное расположение посадочного отверстия под углом $5^{\circ}45'$ относительно основной оси корпуса, что обеспечивает возможность обработки эксцентричных поверхностей и одновременно создаёт дополнительные динамические и прочностные нагрузки на элементы оправки.

Проведен конечно-элементный анализ специальной эксцентричной оправки. Были исследованы пять расчётных случаев: действие силы резания, болтовое закрепление М8 и М10, совместное действие сил резания и закрепления, влияние центробежных сил, а также комплексное нагружение посадочного отверстия $\varnothing 40,05H8$.

Наибольшие напряжения были получены при совместном действии эксплуатационных нагрузок и составили около:

$$\sigma_{max} \approx 214\text{--}216 \text{ МПа}$$

Максимальное перемещение конструкции составило около:

$$U_{max} \approx 0,039\text{--}0,04 \text{ мм}$$

Максимальная эквивалентная деформация не превысила:

$$\varepsilon_{max} \approx 6,7 \times 10^{-4}$$

Полученные напряжения ниже предела текучести стали 40Х, поэтому конструкция работает в упругой области и имеет запас прочности.

Таким образом, результаты МКЭ подтверждают, что специальная эксцентричная оправка выдерживает действие сил резания, усилий болтового закрепления и центробежной нагрузки. Конструкция может быть признана работоспособной для заданных условий токарной обработки.

References

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя – М.: Машиностроение, 2012. – 912 с.
2. Косилова А.Г. Справочник технолога-машиностроителя – М.: Машиностроение, 2003. – 944 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя – М.: Машиностроение, 2001. – 1439 с.

CONCLUSION

In summing up issue No. 5 (2.1), we can note the high level of engagement of the professional community in addressing fundamental and applied problems in the humanities. The presented works confirm that today no scientific discipline develops in isolation: law is closely intertwined with morality and historical mentality, and educational processes are intertwined with psychological characteristics and technological progress.

An analysis of issues related to professional well-being, the protection of honor and dignity in the digital environment, and a detailed study of the status of intellectual property in a debtor's bankruptcy estate create a reliable theoretical basis for further law enforcement practice. At the same time, research in pedagogy and cultural studies opens new horizons for effective communication in a globalized world.

The editors of the International Journal of Professional Science thank the authors for their insightful research and invite them to continue the scholarly dialogue. We are confident that the materials in this issue will not only contribute to the professional growth of readers but also to the development of new vectors of interdisciplinary collaboration in the scientific community.

With best wishes and warm regards,
Editor-in-Chief
International Journal of Professional Science
Krasnova N.A.

Electronic scientific editions

International journal of Professional Science

international scientific journal
№5(2.1)/2026

Please address for questions and comments for publication as well as suggestions
for cooperation to e-mail address mail@scipro.ru



Format 60x84/16. Conventional printed
sheets 13,3
Circulation 100 copies
Scientific public organization
“Professional science”