APRIL 2026 | ISSUE #4(2)

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”, №4(2) - 2026. 258 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 6

ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION 8

Shestakova M.A., Stroganova L.A. Principles and methods of renovation of sanatorium and resort complexes 8

CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE 15

Masalovich M.S., Zagrebelnyy O.A., Evdokimov A.A., Belyaev V.E., Skorb E.V. Quantitative analysis of corrosion inhibitors in formation water by cyclic voltammetry 15

ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES 26

Nwankwo G.C. Environmental Safety in the Techno-Sphere Space 26

ENGINEERING APPLICATIONS 31

Akhrameev V.I., Dadashev F.H., Guseynov N.E., Asadov E.Z. Identification of the main threats and risk factors associated with errors and deficiencies in pilot training, based on the results of the analysis of aviation accident statistics in civil aviation 31

Arslanbekova F.F., Shtogrina A.A. Application of video analytics systems and intelligent individual protection means to monitor safety rules at high altitudes 44

Atyasheva M.S. Engineering Solutions for Ensuring the Safety of Capital Construction Projects in Flood-Prone and Sensitive Areas 52

Fomin I.A. The possibility of using discarded springs as a chisel for plowshares 56

Kurnosov T.G., Ashryatov A.A. Evaluation of the effectiveness of led lighting fixtures 63

Li Yan, Sukhanov G.G. Cascading risks of industrial infrastructure in the context of arctic permafrost degradation: a case study of the Norilsk accident 73

Makaev R.R., Plisko A.L. Evaluation of the effectiveness of digitalization of distribution electrical networks 79

Toigambaev S.K., Abdulmazhidov Kh.A. Thermal hardening as a way to increase the resource of ploughshares 89

Toigambaev S.K., Gusev S.S., Karapetyan M.A. Tests of ploughshares confirm the results of optimal hardness 53-54HRC 97

Zarapkin M.N. Acceptable methods for converting a diesel engine to gaseous fuel 104

Zaykova V.I., Drabenko D.V. Analytical review of automated conveyor production control systems 112

GEOLOGY AND GEOPHYSICS 119

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Elnikova E.A., Sharov P.E. Research on the possibility of using mobile laser scanning (SLAM) for current mine surveying of pebble and scree piles at a placer gold deposit 119

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifullina I.Yu., Remizov N.A. Application of mining and geological information systems (MGIS) and a digital twin of a block for managing ore quality during underground mining 128

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifullina I.Yu., Remizov N.A. Mine Surveying Support for Land Reclamation at the Alluvial Gold Deposit of the Bilir Stream: Survey Methodology and Volume Estimation for Grading Works 137

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Semykin E.S., Sharov P.E. Evaluation of the accuracy of determining the volumes of overburden and production sands during bulldozer development of a placer deposit using GNSS surveying and digital terrain modeling 145

INDUSTRIAL RESEARCH AND PRODUCTION 154
Mitrokhina T.A., Dmitrienko N.A., Cherunova I.V. Using artificial intelligence technologies in designing reconstructed garments 154
MEDICAL RESEARCH AND HEALTHCARE 161
Budzhevich V.V. Hydronephrosis: modern approaches to diagnosis and surgical management 161
Dzhafarov N.A., Mustafina D.D., Ischakov A.I., Vedeshkin V.M., Karyagina N.T. Current concepts of molecular mechanisms of apoptosis: cross-talk of signaling pathways and therapeutic perspectives 166
Ibatov A.D., Lebedev G.S., Pronkin N.N., Shkurenko Yu.V., Igonina M.Yu., Tsarikova S.I., Bateneva A.B., Baikalova S.S. Review on modern methods of cancer screening in the Russian Federation and foreign countries with an analysis of the prospects for the implementation of digital technologies 175
Leus O.K., Volkova P.A. Comparative analysis of the effectiveness of traditional and distance learning formats in a medical university 194
PHYSICAL SCIENCES 200
Ulzi Uyanga, Bayaraa Taigyntuya. Finite element-based self-consistent formulation of the nonequilibrium green's function method for modeling quantum ballistic transport 200
TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS 211
Askarbek M.J., Kurmanbekova E.B. Development of an energy-efficient wooden window unit made of three-layer glued laminated timber with an integrated XPS thermal insulation insert 211
Bakaykin D.A., Epishkin I.A., Idiyatov E.A., Sotov G.E. Restoration of the shape of human limbs based on sensory data in digital technologies 230
Churikov M.V. Development of an air parameters system based on the arduino microcontroller 234
Ovchinnikova S.V., Drabenko V.A., Drabenko N.V. Using artificial intelligence systems in the testing process of security company employees 239
Starostin A.O., Dragin V.S., Kupriyanova O.P. Dragina O.G. Methodology of seamless data transfer in the «3D model – technological process–control program» chain 244
Varakin D.V. Design and development of a software complex for multi-variant operational planning using a scenario builder 252
CONCLUSION 257

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

INTRODUCTION

International Journal Of Professional Science №4(2) – 2026 presents a broad and intellectually rich collection of studies reflecting the current priorities of contemporary science, engineering, technology, and applied research. The issue brings together contributions from architecture and construction, chemistry and materials science, energy and environmental technologies, engineering applications, geology and geophysics, industrial research, medical science, physical sciences, and technological developments. Such thematic diversity demonstrates the growing importance of interdisciplinary knowledge and confirms that effective solutions to modern professional challenges increasingly emerge at the intersection of scientific fields, technological innovation, and practical implementation.

A defining feature of this issue is its strong focus on safety, sustainability, efficiency, and digital transformation. In architecture and construction, attention is directed to the principles and methods of renovation of sanatorium and resort complexes, highlighting the relevance of preserving and modernizing built environments in ways that respond to contemporary functional, social, and economic demands. In chemistry and materials science, the quantitative analysis of corrosion inhibitors in formation water by cyclic voltammetry illustrates the value of precise analytical methods for industrial monitoring and process reliability. In the field of environmental and energy technologies, the discussion of environmental safety in the techno-sphere underscores the necessity of balancing technological development with responsible environmental management.

The engineering section of the issue is especially extensive and addresses a wide spectrum of practical problems, including aviation safety, occupational protection at high altitudes, flood resilience of capital construction projects, agricultural tool durability, lighting efficiency, power distribution digitalization, industrial risks in Arctic conditions, transport engine conversion, and conveyor production control systems. These studies reveal a common research orientation toward improving technological reliability, reducing risks, extending equipment lifespan, and enhancing decision-making through analytical and digital tools. The practical significance of these works lies in their capacity to support industry modernization while responding to increasingly complex operational conditions.

The geology and geophysics contributions continue this applied and technologically advanced perspective by examining mobile laser scanning, mining and geological information systems, digital twins, reclamation surveying, and GNSS-based terrain modeling. These articles reflect the transformation of mineral resource management through digital methods that increase measurement accuracy, improve ore quality control, and support environmentally

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

responsible land-use practices. They also demonstrate how geospatial technologies are becoming central to efficient and transparent extractive industry operations.

Another important dimension of the issue is the integration of artificial intelligence and digital systems into production, healthcare, education, and security-related processes. Research on AI-assisted garment design, digital reconstruction of human limb shapes based on sensory data, AI systems in employee testing, and seamless data transfer across the chain from 3D model to technological process and control program illustrates the expansion of intelligent technologies into both industrial and human-centered domains. These publications show that digital innovation today is not limited to automation alone, but increasingly serves as a foundation for customization, optimization, and more adaptive professional environments.

The medical research section adds further depth to the issue by addressing hydronephrosis, molecular mechanisms of apoptosis, cancer screening methods, and the comparative effectiveness of traditional and distance learning in medical education. Together, these works reflect the growing integration of clinical knowledge, molecular science, public health priorities, and digital educational strategies. They emphasize that healthcare development requires not only advances in diagnosis and treatment, but also modernization of learning systems and broader access to effective screening tools.

The issue is also enriched by fundamental scientific inquiry, as seen in the contribution to physical sciences devoted to a finite element-based self-consistent formulation of the nonequilibrium Green's function method for modeling quantum ballistic transport. The inclusion of such research highlights the journal's commitment to supporting both applied and theoretical science, recognizing that long-term technological progress depends on a strong foundation of fundamental knowledge.

Overall, International Journal Of Professional Science №4(2) – 2026 offers readers a multidimensional view of current scientific and professional development. The articles collected in this issue not only address pressing sector-specific problems, but also reveal broader trends shaping the future of research and practice: digitalization, sustainability, safety-oriented design, data-driven management, and interdisciplinary integration. This issue therefore serves as an important platform for academic exchange and professional dialogue among researchers, engineers, practitioners, and educators.

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

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

UDC 712.01

Shestakova M.A., Stroganova L.A. Principles and methods of renovation of sanatorium and resort complexes

Принципы и методы реновации санаторно-курортных комплексов

Shestakova Maria Alexandrovna,
Bachelor's degree student in Architectural Environment Design, Department of Design,
Voronezh State Technical University, Voronezh
Stroganova Ludmila Alekseevna,
Associate Professor of the Department of Design,
Voronezh State Technical University, Voronezh
Шестакова Мария Александровна,
студент бакалавриата по направлению «Дизайн архитектурной среды» кафедры дизайна, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж
Строганова Людмила Алексеевна
доцент кафедры дизайна,
Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Abstract. *A significant part of sanatorium and resort complexes built in the middle of the 20th century is morally and physically obsolete, not meeting modern standards of comfort, energy efficiency and environmental safety. Direct demolition of such facilities is often economically inexpedient and leads to the loss of cultural and historical identity. The article proposes principles and methods of renovation aimed at preserving the valuable building stock, integrating modern engineering solutions, improving architectural and spatial organization and landscape environment. The authors identify three key approaches: adaptation of planning structures, modernization without changing the load-bearing frame, and landscape revitalization of adjacent territories. The effectiveness of the proposed methods is demonstrated by examples of implemented projects. It is concluded that the renovation of sanatorium and resort complexes should be comprehensive, taking into account medical specialization, natural features and historical context.*

Keywords: *renovation, sanatorium and resort complex, reconstruction, building adaptation, medical architecture, landscape design, energy efficiency, historical buildings.*

Аннотация. *Значительная часть санаторно-курортных комплексов, построенных в середине XX века, морально и физически устарела, не соответствуя современным стандартам комфорта, энергоэффективности и экологической безопасности. Прямой снос таких объектов часто экономически нецелесообразен и ведёт к потере культурно-исторической идентичности. В статье предложены принципы и методы реновации, направленные на сохранение ценного фонда зданий, интеграцию современных инженерных решений, улучшение архитектурно-пространственной организации и ландшафтной среды. Авторами выделены три ключевых подхода: адаптация планировочных структур, модернизация без изменения несущего каркаса, а также ландшафтная ревитализация прилегающих территорий. На примерах реализованных проектов показана эффективность предложенных методов. Сделан вывод о том, что реновация санаторно-курортных комплексов должна носить комплексный характер, учитывая медицинскую специализацию, природные особенности и исторический контекст.*

Ключевые слова: *реновация, санаторно-курортный комплекс, реконструкция, адаптация зданий, медицинская архитектура, ландшафтный дизайн, энергоэффективность, историческая застройка.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

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

Современное состояние санаторно-курортного фонда России характеризуется наличием большого количества зданий, построенных в 1950–1980-х годах. Эти объекты обладают, как правило, удачным местоположением в рекреационных зонах, развитой инфраструктурой и часто представляют архитектурную ценность. Однако их внутренняя планировка, инженерные системы, фасадные решения и энергетическая эффективность не соответствуют текущим нормативным требованиям и ожиданиям потребителей. Простое списание и снос таких комплексов экономически затратны и ведут к утрате градостроительного наследия. Поэтому реновация становится наиболее рациональной стратегией.

Актуальность темы определяется необходимостью сохранить уникальные лечебно-оздоровительные территории, одновременно повысив их конкурентоспособность на рынке медицинского и пляжного туризма. Реновация санаторно-курортного комплекса отличается от обычного капитального ремонта или реконструкции тем, что предполагает изменение функциональной модели, улучшение архитектурной выразительности и интеграцию современных экологических стандартов. При этом медицинская специализация (лечение органов дыхания, опорно-двигательного аппарата, сердечно-сосудистой системы) накладывает дополнительные ограничения и требования к объёмно-планировочным решениям.

Цель исследования – систематизировать принципы и методы реновации санаторно-курортных комплексов, позволяющие продлить срок их службы, повысить комфорт и энергоэффективность без утраты идентичности. На основе анализа отечественного и зарубежного опыта сформулированы практические рекомендации для проектирования. Так же стоит учитывать принцип функциональной адаптации. Планировочная структура санатория должна быть перестроена под современные медицинские технологии: разделение потоков пациентов и персонала, создание универсальных лечебных кабинетов, обеспечение безбарьерной среды. Принцип энергоэффективности и экологической безопасности. Утепление фасадов, замена окон, установка систем рекуперации тепла, использование возобновляемых источников энергии (солнечные коллекторы, тепловые насосы) позволяют снизить эксплуатационные расходы и уменьшить углеродный след. Принцип интеграции с ландшафтом. Санаторно-курортные комплексы традиционно располагаются в живописных местах – у воды, в лесу, в горах. Реновация должна раскрывать природный потенциал территории: создавать маршруты лечебной ходьбы (терренкуры), видовые

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

террасы, зимние сады.

В зависимости от технического состояния и исторической значимости здания применяются различные методы. Наиболее распространёнными являются три подхода.

Метод 1 – мягкая адаптация с сохранением каркаса. Применяется для объектов с достаточной несущей способностью. Внутренние перегородки демонтируются, создаётся свободная планировка (open space), которая затем зонируется под медицинские и гостевые функции. Фасады очищаются, при необходимости добавляются современные облицовочные материалы (например, вентилируемые фасады из композитных панелей). На рис. 1 показан пример реконструкции спального корпуса санатория «Белые ночи» (Ленинградская область), где после перепланировки удалось увеличить площадь номеров на 30 % без изменения внешних габаритов.

Рис. 1. Спальный корпус санатория «Белые ночи»

Метод 2 – надстройка и пристройка для увеличения функциональности. Когда существующих площадей недостаточно для современных медицинских блоков (бассейны, тренажёрные залы, грязелечебницы), допускается надстройка мансардных этажей или пристройка лёгких объёмов к глухим фасадам. Важно, чтобы новые элементы визуально отличались от исторического здания, но не конфликтовали с ним по масштабу и материалам. На рис.2 представлен проект реновации санатория «Горный воздух» (Кисловодск), где к существующему трёхэтажному корпусу пристроен стеклянный объём с панорамным лифтом и зоной водолечения.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рис. 2. Пристройка лифтового узла и зоны водолечения к историческому корпусу санатория «Горный воздух».

Метод 3 – ландшафтная реновация и создание рекреационной среды. Часто территория санатория находится в запущенном состоянии: зарастание, разрушение малых архитектурных форм, отсутствие маршрутов. Метод включает восстановление парковой зоны, прокладку экологических троп, оборудование площадок для лечебной физкультуры на открытом воздухе. Также эффективно устройство зелёных кровель на пристройках и пандусах. На рис. 3 показан пример благоустройства территории санатория «Серебряный ключ» (Алтайский край) с созданием терренкура вдоль реки.

Рис. 3. Терренкур и видовые площадки после ландшафтной реновации санатория «Серебряный ключ».

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Для каждого типа санаторно-курортного комплекса необходимо подбирать индивидуальное сочетание методов. Так, для памятников архитектуры регионального значения предпочтительна мягкая адаптация с минимальным вмешательством в фасады; для объектов массовой застройки 1970–80-х годов допустимы надстройки и пристройки; для комплексов, утративших лечебную функцию, возможно полное перепрофилирование (например, в реабилитационные центры или глэмпинги) с сохранением планировочной структуры.

В качестве положительного примера комплексной реновации можно привести санаторий «Дюны» (Курортный район Санкт-Петербурга). Четырёхэтажное здание 1962 года постройки имело узкие коридоры, малометражные палаты и устаревшую систему отопления. В ходе реновации (2020–2023 гг.) были:

· полностью заменены инженерные сети;

· произведено перепланирование: из двух палат сделана одна «люкс» с санузлом;

· фасад утеплён и облицован фиброцементными плитами под дерево;

· на крыше установлен зимний сад с зоной релаксации;

· парк очищен и дополнен настильными дорожками для людей с ограниченными возможностями.

В результате загрузка санатория выросла с 55 % до 92 %, а сезонность использования снизилась. Этот пример подтверждает, что реновация может быть экономически эффективнее нового строительства при условии грамотного проектирования.

Отрицательным примером служит снос санатория «Чайка» в Геленджике, который был полностью демонтирован в 2018 году под строительство элитного жилого комплекса. Несмотря на удовлетворительное техническое состояние здания и его удачное местоположение, собственник предпочёл полную замену. В результате была утрачена возможность сохранить лечебную функцию на этой территории, а новый объект не имеет статуса санатория и не обеспечивает медицинских услуг.

При реновации санаторно-курортного комплекса важно не только обновить здания, но и организовать оптимальные маршруты движения пациентов. Они должны включать:

· медицинскую диагностику (первый этаж, близко к входу);

· процедурные кабинеты (связь с лифтами);

· столовую и клубную часть (в середине дня);

· спальные номера (верхние этажи и тихие зоны);

· прогулочные маршруты (терренкуры, ведущие от корпуса к парку и пляжу).

Видовые точки, места для отдыха с лавочками и навесами, информационные

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

стенды о лечебных свойствах местной флоры – всё это формирует уникальный опыт и повышает лояльность гостей. Модульные элементы (например, сезонные террасы, передвижные кабинеты функциональной диагностики) позволяют быстро адаптировать пространство под меняющийся спрос.

Выводы. В ходе исследования были систематизированы принципы и методы реновации санаторно-курортных комплексов. Реновация позволяет продлить жизненный цикл зданий на 30–50 лет без их полного сноса, сохраняя градостроительную и культурную ценность. Наиболее эффективны комплексные проекты, включающие одновременно планировочную перестройку, модернизацию инженерных систем и ландшафтную ревитализацию. Для разных типов комплексов (памятники архитектуры, типовые советские постройки, деградированные объекты) требуются различные методы: от мягкой адаптации до надстроек и полного перепрофилирования. Реновация должна учитывать медицинскую специализацию санатория и современные стандарты доступности и энергоэффективности. Ландшафт является неотъемлемой частью лечебного процесса – терренкуры, зелёные кровли и видовые площадки усиливают рекреационный потенциал.

Таким образом, реновация санаторно-курортных комплексов – это стратегия устойчивого развития, позволяющая сочетать сохранение наследия, экономическую эффективность и качество медицинских услуг. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку нормативной базы для оценки целесообразности реновации и на цифровое моделирование вариантов реконструкции.

References

1. Белоусова Л.С., Григорьева Т.А. Архитектурно-планировочная реорганизация санаторно-курортных комплексов на примере Кавказских Минеральных Вод // Архитектура и строительство России. 2021. № 3 (245). С. 44–51.

2. Косенкова Н.А., Казакова Ю.Н. Современные тенденции проектирования туристско-рекреационных комплексов // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 4. С. 99–105.

3. Михайлов А.С., Фролова В.П. Энергоэффективная реновация зданий лечебно-оздоровительного назначения // Жилищное строительство. 2022. № 8. С. 24–30.

4. Иванова О.В. Реновация курортных территорий: европейский опыт и российские перспективы // Урбанистика. 2020. № 2 (11). С. 55–63.

5. Санаторий «Дюны»: проект реновации [Электронный ресурс]. URL: https://archi.ru/projects/9531/dyuny (дата обращения: 02.04.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

6. Горный воздух: пристройка к историческому корпусу [Электронный ресурс]. URL: https://www.archdaily.com/987654/mountain-air-extension (дата обращения: 02.04.2026).

7. Терренкуры в санаториях Алтая [Электронный ресурс]. URL: https://altay-sanatorium.ru/landscape (дата обращения: 02.04.2026).Косенкова Н.А., Казакова Ю.Н. Современные тенденции проектирования туристско-рекреационных комплексов // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 4. С. 99-105.

8. Вавилонская Т.В., Салейкина Ю.В. Принципы проектирования туристско-рекреационных комплексов в условиях свободной экономической зоны // Градостроительство и архитектура. 2014, № 2. С. 6-12.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE

UDC 543.552

Masalovich M.S., Zagrebelnyy O.A., Evdokimov A.A., Belyaev V.E., Skorb E.V. Quantitative analysis of corrosion inhibitors in formation water by cyclic voltammetry

Количественный анализ ингибиторов коррозии в пластовой воде методом циклической вольтамперометрии

Masalovich Maria Sergeevna,
Associate Professor of Infochemistry Scientific Center, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), St. Petersburg
Zagrebelnyy Oleg Anatolevich,
Researcher of Infochemistry Scientific Center, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), St. Petersburg
Evdokimov Alexey Alexandrovich,
Engineer of Infochemistry Scientific Center, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), St. Petersburg
Belyaev Vadim Evgenievich,
Junior Researcher of Infochemistry Scientific Center, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), St. Petersburg
Skorb Ekaterina Vladimirovna,
Professor, Director of Infochemistry Scientific Center, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), St. Petersburg
Масалович Мария Сергеевна,
доцент НОЦ инфохимии, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), г. Санкт-Петербург
Загребельный Олег Анатольевич,
научный сотрудник НОЦ инфохимии, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), г. Санкт-Петербург
Евдокимов Алексей Александрович,
инженер НОЦ инфохимии, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), г. Санкт-Петербург
Беляев Вадим Евгеньевич,
младший научный сотрудник НОЦ инфохимии, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), г. Санкт-Петербург
Скорб Екатерина Владимировна,
профессор, директор НОЦ инфохимии, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), г. Санкт-Петербург

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Abstract. *The article describes a new method for determining the concentration of the corrosion inhibitor benzotriazole in formation water by cyclic voltammetry using single-use screen-printed copper electrodes of a strictly specified area. Using the Langmuir model, the adsorption coefficient of the inhibitor on the copper surface was calculated and an equation was derived that relates the change in the electrochemical response from the concentration of benzotriazole, taking this coefficient into account. As the electrochemical response, the amount of electricity obtained by integrating the current over time under the anode peak of each fifth cyclic voltammogram at a given concentration of benzotriazole was selected. The technique is simple in hardware and can be applied in the field.*

Keywords: *inhibitors, corrosion, benzotriazole, cyclic voltammetry, Langmuir equation, adsorption coefficient, coating coefficient*

Аннотация. *В статье описан новый способ определения концентрации ингибитора коррозии бензотриазол в пластовой (попутно добываемой) воде методом циклической вольтамперометрии с помощью однократно используемых трафаретно-печатных медных электродов строго заданной площади. С помощью модели Ленгмюра был рассчитан коэффициент адсорбции ингибитора на поверхности меди и выведено уравнение, связывающее изменение электрохимического отклика от концентрации бензотриазола, с учетом этого коэффициента. В качестве электрохимического отклика было выбрано количество электричества, полученное интегрированием тока по времени под анодным пиком каждой пятой цикловольтамперограммы при заданной концентрации бензотриазола. Методика проста в аппаратурном оформлении и может быть применена в полевых условиях.*

Ключевые слова: *ингибиторы, коррозия, бензотриазол, циклическая вольтамперометрия, уравнение Ленгмюра, коэффициент адсорбции, коэффициент покрытия*

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

Ингибиторная защита представляет собой гибкий, универсальный и малозатратный метод антикоррозионной защиты, который помогает замедлить коррозию промысловых трубопроводов. Этот подход основан на использовании химических веществ — ингибиторов коррозии, которые формируют защитную пленку или молекулярный адсорбционный слой на внутренней поверхности трубопроводов, тем самым снижая скорость коррозийных процессов.

Эффективность этой пленки зависит от её поддержания в рабочем состоянии через регулярное добавление ингибитора. Это означает, что необходимо обеспечить стабильное поступление ингибитора в поток транспортируемой жидкости с постоянным дозированием. С одной стороны, доза ингибитора должна быть достаточной для снижения скорости коррозии металла трубопровода до приемлемого уровня, что определяется в ходе опытно-промышленных испытаний и уточняется в процессе эксплуатации конкретного трубопровода. С другой стороны, максимальная концентрация ингибитора ограничивается экономическими факторами и его воздействием на окружающую среду.

Ключевым параметром, мониторинг которого позволяет оценить соблюдение технологических требований к эксплуатации трубопровода и эффективность ингибирования, является остаточное содержание ингибитора (ОСИ).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Известны спектрофотометрические и спектрофлюорометрические способы, а также ряд электрохимических способов определения концентрации ингибиторов коррозии. Большинство из них являются лабораторными методиками и не пригодны к использованию для поточного анализа или анализа в полевых условиях.

Базовым подходом к определению ОСИ, в частности на основе алкилимидазолинов, является экстракция хлороформом молекулярных ассоциатов ингибитора с азокрасителем с последующим спектрофотометрическим или фотоколориметрическим детектированием по характеристической длине волны [1]. Способ достаточно специфичен и подходит только для ингибиторов, образующих устойчивые ассоциаты. Ограничением данного способа также является многостадийность и трудоемкость пробоподготовки перед измерениями оптической плотности растворов ингибитора.

Использование люминесцентных способов [2] ограничено способностью молекул ингибиторов к релаксации по излучательному механизму.

Среди вольтамперометрических известен метод оценки концентрации по величине анодного пика от катион-радикалов, образующихся в результате предварительного электрохимического окисления. Построение калибровочных кривых основано на способности ингибиторов кислотной коррозии, таких как "Секангаз - 9Б", "Виско - 904 NIK", "Сепакорр - 5478 АМ", "Додиген 4482 - 1", к электрохимическому окислению в неводных средах до соответствующих катион-радикалов при потенциале 1,0 В [3].

В патенте [4] описан подход к определению концентрации ингибиторов коррозии, в том числе на основе алкилимидазолинов, методом квадратно-волновой вольтамперометрии или дифференциально-импульсной вольтамперометрии (полярографии). Пики сорбции (восстановления) ингибиторов фиксируются в отрицательной области потенциалов. Однако существует ряд сложностей для автоматизации методики: для проведения измерений необходима сложная конструкция электрохимической ячейки с использованием ртути, дегазация электрохимической ячейки во избежание самопроизвольного окисления адсорбированных молекул, поддержание pH растворов буферными системами, более того ингибиторы различного типа могут иметь пики в различном диапазоне потенциалов, что усложняет процесс регистрации и обработки сигнала.

Известен также способ определения ингибитора коррозии октадециламина в водном теплоносителе [5] по количеству электричества под пиками кислородной газоразрядки. С увеличением содержания октадециламина площадь пиков тока, связанных с выделением кислорода, пропорционально уменьшается. Концентрацию

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

октадециламина определяют по разнице в измерениях параметра адсорбции кислорода до и после контакта электрода с водным теплоносителем по калибровочной зависимости.

Среди электрохимических способов определения концентрации ингибиторов коррозии также известен способ оценки содержания ингибитора в многоэлектродной системе [6]. В патенте описан комплексный подход с использованием методов хроноамперометрии и импедансметрии. Предсказание концентрации ингибитора осуществляется путем обработки множества сигналов – хроноамперометрических кривых и диаграмм Найквиста – и сопоставления с моделью машинного обучения, в виде классификации или регрессии. Тем не менее регрессионная зависимость предсказанной концентрации от истинной не показала высокое значение коэффициента детерминации (R^2 составил 0,8554).

Настоящее исследование направлено на создание электрохимической методики, позволяющей в полевых условиях получить данные об остаточной концентрации ингибитора в пластовой воде [7].

Экспериментальная часть

Измерения проводили в полной электрохимической ячейке с помощью одноразовых печатных медных электродов, изготовленных методом электрохимического травления фольгированного стеклотекстолита FR4 (Резонит, Россия) при комнатной температуре и атмосферных условиях. Каждый печатный электрод состоял из внутреннего круга (площадь 7,1 мм²) и внешнего кольца (площадь 25,5 мм²), выполненных из медной фольги, разделённых изолирующей полосой стеклотекстолита. Токосъемники от круга и кольца (рабочего и вспомогательного электродов, соответственно) подключали к соответствующим выводам потенциостата-гальваностата P-150X фирмы Elins.

В качестве фонового электролита использовали модель пластовой воды, содержащую следующие концентрации ионов [мг/дм³]: Ca^{2+} 561, Ba^{2+} 72, Sr^{2+} 169, Mg^{2+} 44, Na^{+} 6580, K^{+} 12, Cl^{-} 11120, HCO_3^{-} 275. Общая минерализация составила 18,8 г/дм³. В качестве ингибитора использовали коммерчески доступный реактив бензотриазол (CAS 95-14-7, ChimCraft, Россия) без предварительной очистки. Для цикловольтамперометрических измерений была подготовлена серия растворов пластовой воды с концентрациями бензотриазола от 0 до 60 г/м³.

Электрохимический отклик регистрировали в режиме циклической вольтамперометрии. Каждое измерение включало 5 циклических вольтамперограмм, зарегистрированных в диапазоне напряжений от -1,5 В до +1,5 В со скоростью сканирования 50 мВ/с, после чего печатные электроды и растворы утилизировали.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Далее интегрировали ток анодного пика пятого цикла и строили калибровочный график зависимости интегрального тока от концентрации ингибитора.

Физико-химическое описание взаимодействия ингибитора с поверхностью электрода проводили путем моделирования изотермой монослойной адсорбции Ленгмюра [8], рассчитывали коэффициент адсорбции, и далее проводили коррекцию калибровочного графика с учетом коэффициента адсорбции.

Линейную аппроксимацию и нелинейную аппроксимацию моделью Ленгмюра осуществляли в программном пакете OriginPro 2024.

Результаты и обсуждение

Электрохимические свойства медных электродов в двухэлектродной симметричной ячейке в пластовой воде заданной минерализации без ингибитора и в присутствии бензотриазола показаны на рис.1.

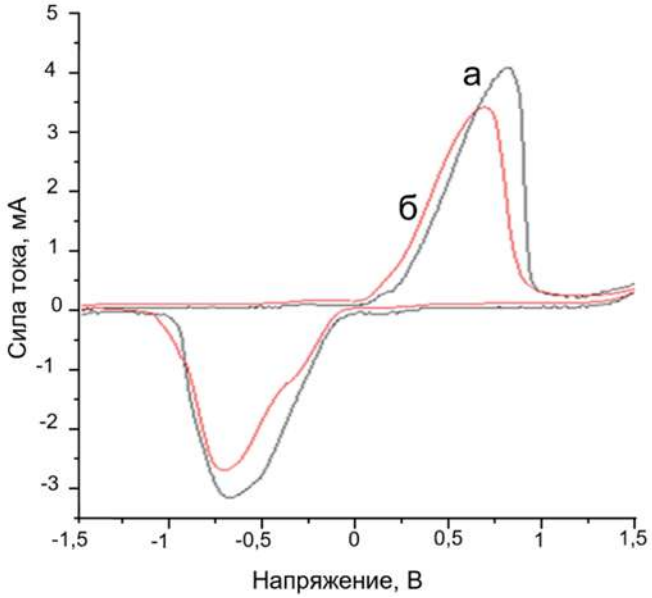


Рисунок 1. Циклические вольтамперограммы, полученные на печатном медном электроде в пластовой воде, а- без ингибитора, б – в присутствии ингибитора, скорость сканирования потенциала 50 мВ/с

Как видно из рисунка, электроактивное поведение меди проявляется двумя пиками в соответствии с величиной приложенного напряжения. При положительном смещении при +0,8 В наблюдается анодный пик, вероятно, обусловленный окислением меди рабочего электрода до оксида меди (I), гидроксида меди (II) или хлорида меди (I) [9]. При отрицательном потенциале при -0,6 В регистрируется катодный пик, обусловленный, по-видимому, окислением противоэлектрода, в то же время может происходить и восстановление окисленных фрагментов до Cu^0 на рабочем электроде.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

При добавлении раствора ингибитора пики тока уменьшаются пропорционально добавленной концентрации ингибитора, что согласуется с представлениями об образовании молекулами бензотриазола поверхностной пленки, препятствующей дальнейшей коррозии металла. Таким образом, построив калибровочную зависимость токовой характеристики от концентрации бензотриазола, можно будет определять неизвестное содержание данного ингибитора в пластовой воде. В данной работе в качестве токовой характеристики выбрано количество электричества, затраченное на окисление рабочего электрода (численно равная площади под анодным пиком цикловольтамперограммы).

На рис. 2 показана калибровочная кривая в виде линейной убывающей функции, демонстрирующая уменьшение количества электричества, проходящего через двухэлектродную ячейку при добавлении бензотриазола в диапазоне концентраций от 10 до 60 г/м^3.

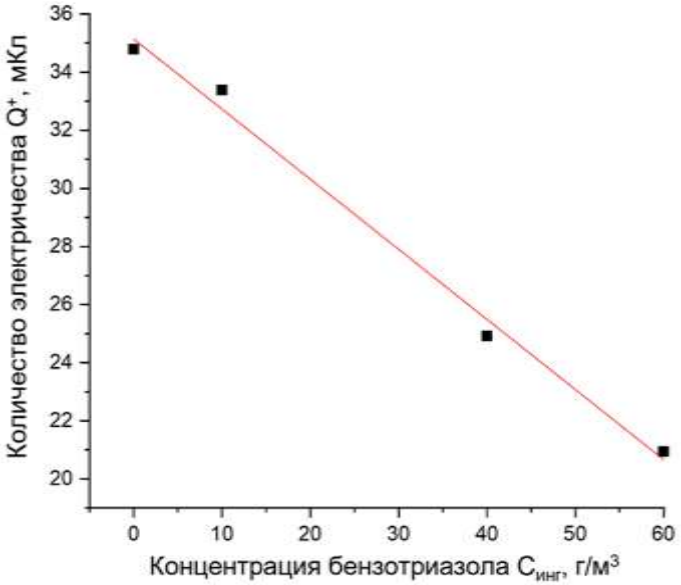


Рисунок 2. Калибровочный график зависимости количества электричества, полученного интегрированием тока под анодной волной цикловольтамперограммы по времени, от концентрации ингибитора

Поскольку очевидно, что количество электричества, проходящее через электрохимическую ячейку, зависит от плотности покрытия электрода ингибитором, то можно представить изучаемую зависимость в координатах коэффициента покрытия Θ от концентрации ингибитора, где Θ рассчитывается по формуле [10]:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$\Theta = 1 - \frac{Q^+}{Q_0^+} \quad (1)$$

где Q^+ - положительный заряд вольтамперограммы при данной концентрации ингибитора $C_{инг}$, Q^+_0 - положительный заряд вольтамперограммы при $C_{инг}$ = 0. (Рис. 3).

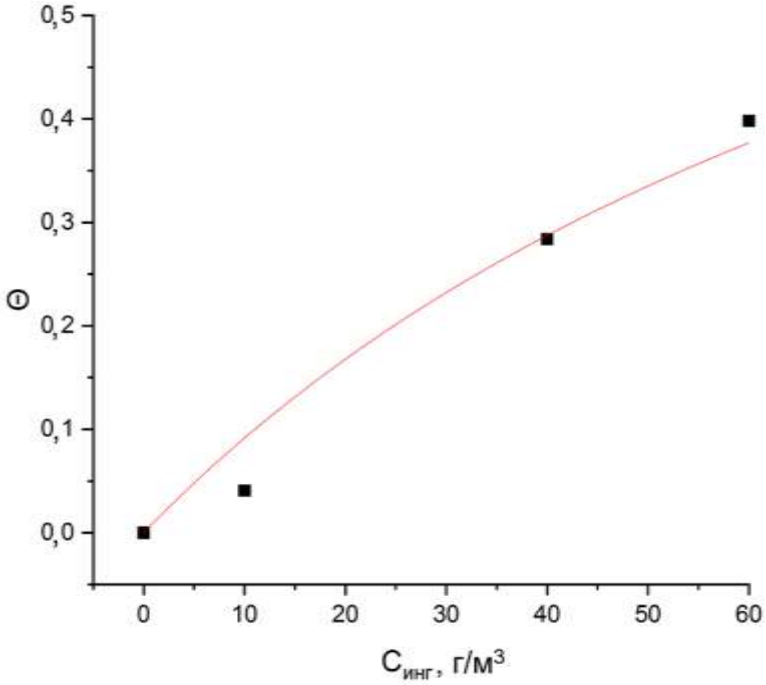


Рисунок 3. Зависимость коэффициента покрытия медной поверхности от концентрации ингибитора с аппроксимацией изотермой Ленгмюра

Допуская, что покрытие образовано монослоем ингибитора, полученную зависимость можно аппроксимировать изотермой Ленгмюра, описываемой уравнением (2):

$$y = \frac{abx}{1 + bx} \quad (2)$$

где a=1, b=$K_{адс}$=0,01008 м^3/г, что эквивалентно 1200 дм^3/моль, x=$C_{инг.}$

Перепишем уравнение (2) в виде (3):

$$\Theta = \frac{K_{адс} C_{инг}}{1 + K_{адс} C_{инг}} \quad (3)$$

Приравняв правые части уравнений (1) и (3), выразим количество электричества Q^+ через концентрацию ингибитора $C_{инг}$:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$Q^{+} = Q_0^{+}\left(1 - \frac{K_{адс}C_{инг}}{1 + K_{адс}C_{инг}}\right) = \frac{Q_0^{+}}{1 + K_{адс}C_{инг}} \quad (4)$$

Далее исходную калибровочную зависимость количества электричества от концентрации бензотриазола можно скорректировать через уравнение (4) и построить соответствующий график (Рис. 4).

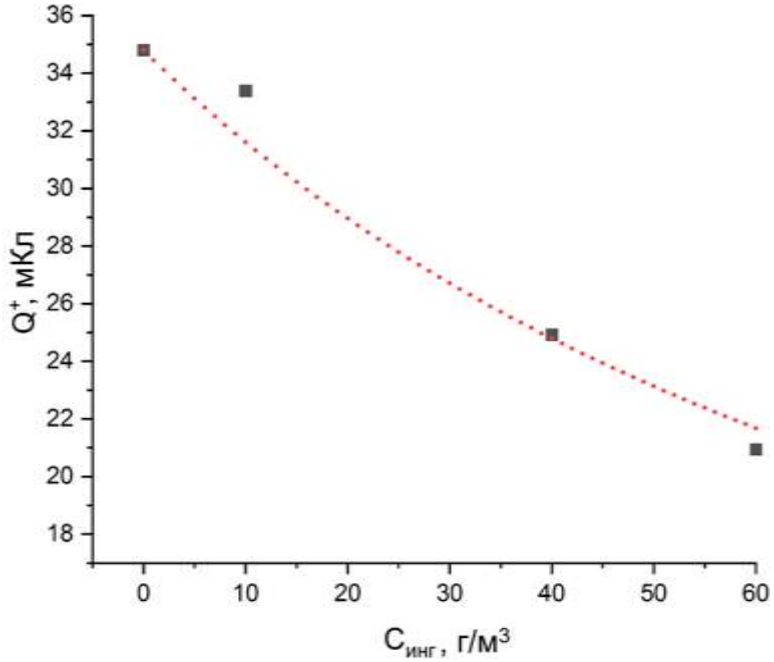


Рисунок 4. Калибровочный график зависимости количества электричества Q^{+} от концентрации ингибитора с аппроксимацией по уравнению (4), где $K_{адс}$=1200 дм^3/моль

Уравнение Ленгмюра таккже позволяет вычислить энергию Гиббса при адсорбции молекул ингибитора на поверхность и определить, к какому типу - физической или химической адсорбции относится описываемый процесс или оценить преимущественный вклад того или иного типа адсорбции [11] в соответствии с уравнением (5):

$$K_{адс} = \frac{1}{C_{H_2O}}\exp\left(-\frac{G^0_{адс}}{RT}\right) \quad (5)$$

где $\Delta G^0_{адс}$ – стандартная свободная энергия адсорбции, C_{H2O} – молярная концентрация жидкой воды, равная 55,34 М при 25° С, R – универсальная газовая постоянная, численно равная 8,31446262 м^2 кг с$^{-2}$ К$^{-1}$ моль$^{-1}$, T – температура [К].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рассчитанное значение $\Delta G^0_{адс}$ при 298 K равно $\Delta G_{адс}$ = -27509 Дж/моль для бензотриазола на медных электродах, что согласуется с литературными данными [12-14].

Отрицательные значения ΔG^0_{ads} связаны с самопроизвольной адсорбцией ингибитора на поверхности меди [15]. В общем, принято, что для значений до -20 кДж/моль, процесс протекает по принципу физической адсорбции, при которой ингибирование обусловлено электростатическими взаимодействиями между заряженными молекулами и заряженной металлической поверхностью, в то время как значения в области -40 кДж /моль или меньше рассматривались как хемосорбция, обусловленная распределением заряда или переносом заряда от молекул ингибитора на металлическую поверхность с образованием ковалентной связи [16, 17]. Значения -27,5 кДж/моль можно отнести к преимущественной физической сорбции с незначительным вкладом хемосорбции.

Заключение

Бензотриазол – ингибитор, широко используемый для профилактики коррозии меди и ее сплавов. В ходе настоящего исследования был разработан способ количественного определения бензотриазола в пластовых (попутно-добываемых) водах путем анализа циклических вольтамперограмм, полученных на одноразовых трафаретно-печатных медных электродах строго заданной площади. Анализ проводят с помощью потенциостата и упрощенной двухэлектродной электрохимической ячейки, без дорогостоящей платины и электрода сравнения, что удешевляет и облегчает автоматизацию процесса, а также использование в полевых условиях.

Применение модели монослойной адсорбции Ленгмюра позволило рассчитать коэффициент адсорбции бензотриазола на поверхности меди и скорректировать калибровочную зависимость электрохимического отклика от концентрации с учетом этого коэффициента.

Решение задачи оперативного мониторинга остаточного содержания ингибитора позволяет управлять процессами снижения скорости коррозии в трубопроводах нефтегазовой отрасли с возможностью гибкого реагирования на изменение коррозионной ситуации, что дает возможность снизить капитальные затраты и текущие расходы на эксплуатацию.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. ASTM D2327-80. Method of Test for Primary and Secondary Amines in Water, 1989

2. US5278074A. Method of monitoring and controlling corrosion inhibitor dosage in aqueous systems, 1992.

3. Ru 2145079 C1. Способ количественного определения ингибиторов кислотной коррозии в неводных средах, Бюл. 3, 2000.

4. EP 3168 611 A1. Corrosion or scale inhibitor dosage in industrial water, Bull. 2017/20.

5. Ru 2107286 C1. Способ определения концентрации октадециламина в водном теплоносителе и устройство для его осуществления, 1998.

6. US 2020/ 0176088 A1. Method and system for estimating corrosion inhibitor concentration using a multi-electrode array sensor, 2020.

7. Патент 2823917 C1. Российская Федерация. Способ определения концентрации ингибиторов коррозии в пластовой воде (варианты). Масалович М.С., Алиев Т.А., Загребельный О.А., Евдокимов А.А., Домарева Н.П., Беляев В.Е., Петрова М.С., Скорб Е.В. Опубликовано 30.07.2024, бюл. №22.

8. I. Langmuir. The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum. J. Am. Chem. Soc., 40 (1916), p. 1361

9. Aliev, T., et al. (2023). Electrochemical Sensor to Detect Antibiotics in Milk Based on Machine Learning Algorithms. ACS Appl. Mater. Interfaces, 15(44), 52010-52020. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.3c12050

10. Y. Chen, Y.Y. Jiang, Z.Y. Ye, Z. Zhang; Adsorption Dynamics of Benzotriazole on Copper in Chloride Solution. CORROSION 1 September 2013; 69 (9): 886–892. https://doi.org/10.5006/0889

11. P. M. Niamien, F. K. Essy, A. Trokourey, D. Sissouma, and D. Diabate, Inhibitive effects of 2-mercaptobenzimidazole (MBI) and 2-thiobenzylbenzimidazole (TBBI) on copper corrosion in 1 M nitric acid solution, African Journal of Environmental Science and Technology, 5 (2011) 641-652.

12. Gerengi, H., Bereket, G. Adsorption and inhibition effect of benzotriazole on brass-118 and brass-MM55 in artificial seawater. Prot Met Phys Chem Surf 48, 361–366 (2012). https://doi.org/10.1134/S2070205112030070

13. KHADOM, ANEES A, YARO, APRAEL S, & KADHUM, ABDUL AMIR H. (2010). ADSORPTION MECHANISM OF BENZOTRIAZOLE FOR CORROSION INHIBITION OF COPPER-NICKEL ALLOY IN HYDROCHLORIC ACID. Journal of the Chilean Chemical Society, 55(1), 150-152. https://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072010000100035

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

14. Parook Feroz Khan, Vaithianathan Shanthi, Rupesh K. Babu, Srinivasan Muralidharan, Rakesh Chandra Barik, Effect of benzotriazole on corrosion inhibition of copper under flow conditions, Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 3, Issue 1, 2015, Pages 10-19, https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.11.005

15. J.D. Talati, D.K. Gandhi, N-heterocyclic compounds as corrosion inhibitors for aluminium-copper alloy in hydrochloric acid, Corrosion Science, 23 (1983) 1315-1332.

16. Z. Szklarska-Smialowska, J. Mankowski, Crevice corrosion of stainless steels in sodium chloride solution, Corrosion Science, 18 (1978) 953-960.

17. A. Yurt, S. Ulutas, H. Dal, Electrochemical and theoretical investigation on the corrosion of aluminium in acidic solution containing some Schiff bases, Applied Surface Science, 253 (2006) 919-925.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES

UDC 504.064

Nwankwo G.C. Environmental Safety in the Techno-Sphere Space

Nwankwo Gerald Chinonso
Student, department of creative management and humanities graduate institute
Ural State University of Economics

Abstract. *The rapid expansion of the Technosphere – the set of structures, systems, and materials created by humans – has generated unprecedented environmental challenges at the interface with the natural biosphere. This article examines the fundamental principles of environmental safety in techno spheric spaces, analyzing the sources and mechanisms of anthropogenic pollution, including heavy metal contamination, chemical load, and ecosystem disruption. The study synthesizes current research on monitoring methodologies, emphasizing the transformative role of artificial intelligence and Internet of Things technologies in real-time pollution detection and management. Attention is paid to the cumulative effects of industrial clusters on adjacent agricultural landscapes and sanitary protection zones. The article concludes that ensuring environmental safety in the Technosphere requires an integrated approach that combines legislative regulation, continuous monitoring systems, circular economy principles, and the development of inherently safer technologies.*

Keywords: *Technosphere, environmental security, anthropogenic pollution, industrial emissions, heavy metals, environmental monitoring, artificial intelligence, Internet of Things, biosphere-sustainable development interaction.*

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

Introduction

The concept of the Technosphere emerged in the 20th century as a recognition that human activity had created a new global entity: an artificial envelope encompassing all technical devices, structures, vehicles, and transformed territories [1]. This Technosphere now represents a geological force comparable to natural processes. According to recent estimates, the total mass of human-made materials has reached approximately 30 trillion tons, and the annual increase in anthropogenic mass exceeds the total biomass of wild living organisms by an order of magnitude [1]. The formation of the Technosphere has fundamentally altered the conditions of human existence, creating both unprecedented opportunities and new risks. Environmental security in techno spheric spaces has therefore become one of the most pressing problems facing contemporary civilization. This article aims to systematically examine the nature of the environmental threats emanating from the Technosphere, the methods for their assessment and monitoring, and the pathways toward sustainable coexistence between

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

technological and natural systems.

The Technosphere as an Environmental Domain

Definition and Scope

The Technosphere encompasses all objects and systems built by humans: industrial enterprises, transportation infrastructure, residential and commercial buildings, communication networks, and the accumulated mass of consumer goods and waste [1][9]. Unlike the biosphere, which developed through evolutionary processes over billions of years, the Technosphere is a relatively recent phenomenon that has evolved with extraordinary rapidity, especially since the mid-20th century. Belov points out that the Technosphere represents a qualitatively new habitat for humanity, characterized by specific harmful and traumatic factors that were absent in the natural environment [7]. The emergence of the Technosphere did not eliminate or replace the biosphere, but rather overlapped with it, creating complex zones of interaction where technological and natural processes coexist and compete.

Material Flows and Environmental Burden

The functioning of the techno sphere requires continuous extraction, processing, and circulation of materials. These material flows constitute the metabolic footprint of technological civilization. The concept of anthropogenic chemical burden quantifies the total mass of synthetic and natural compounds released into environmental matrices due to industrial, agricultural, and domestic practices [10]. This burden includes persistent organic pollutants, heavy metals, pharmaceuticals, plastic additives, and many other substances derived exclusively from human technological production. Major contributors to environmental pollution include manufacturing processes, wastewater discharge, byproducts of fossil fuel combustion, and the intensive application of agrochemicals. These sources release pollutants into the air, water, and soil, where they interact with biological systems, often with harmful effects [10].

Sources and Mechanisms of Technogenic Pollution

Industrial Emissions and Heavy Metal Pollution

Industrial enterprises represent concentrated sources of technogenic pollution. Research conducted in industrial clusters demonstrates that stationary pollution sources emit significant quantities of heavy metals, such as manganese, chromium, lead, nickel, copper, cobalt, and cadmium [2][5]. These emissions disperse into the surrounding environment, and dispersion patterns are significantly influenced by climatic conditions: wind direction, precipitation regimes, and atmospheric stability affect the spatial distribution of pollutants. A study of the health protection zones surrounding industrial enterprises in Zhytomyr revealed that maximum permissible concentrations for several heavy metals were exceeded [5]. The research established that soil acidity, measured using active, exchangeable, and hydrolytic

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

parameters, plays a crucial role in determining the mobility and bioavailability of metals. The research also identified that areas where the protection zones of multiple industrial facilities overlap experience more severe environmental consequences, with cumulative pollution loads exceeding those associated with individual companies [5]. The toxicity of technological substrates can be effectively assessed using bioindication methods. A study using white-tipped radish (Raphanus sativus var. radicula) as a test subject demonstrated a strong inverse correlation between distance from emission sources and soil phytotoxicity indicators [2]. Inhibition of root growth in the test plants reliably identified toxicity levels ranging from medium to above average, confirming the usefulness of biological indicators for integrated pollution assessment.

Pathways to Environmental Safety

Legislative and Regulatory Frameworks

Ensuring environmental safety in techno spheric spaces requires robust legislative frameworks that establish permissible limits for pollutant concentrations, mandate monitoring programs, and ensure compliance. Regulatory instruments must address not only individual emission sources but also the cumulative effects of multiple facilities and the combined impact of various pollutants [5][10]. Health protection zones surrounding industrial enterprises represent an important regulatory mechanism. These buffer zones create spaces between pollution sources and populated areas, providing room for pollutants to attenuate before human populations are exposed [5]. However, the effectiveness of buffer zones depends on proper sizing based on emission characteristics, local weather conditions, and topography; factors that require a site-specific assessment.

Circular Economy and Material Closure

The fundamental reduction of technogenic environmental impact requires a transformation of the linear “extract-produce-dispose” model that currently characterizes most industrial production. The principles of the circular economy emphasize material efficiency, waste prevention, reuse, recycling, and the design of products for greater durability and recovery at the end of their useful life [9][10]. The concept of techno spheric nutrients—high-quality technical materials designed for a closed and perpetual industrial cycle—offers a way to eliminate waste as a category [9]. If materials can circulate continuously within the techno sphere without degradation or leakage into the biosphere, the environmental burden of materials production could be drastically reduced.

Green Chemistry and Safer Technologies

The design of inherently safer technologies, based on the principles of green chemistry, addresses pollution at its source. Replacing hazardous substances with benign alternatives, designing synthetic routes that avoid toxic intermediates and byproducts, and developing

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

catalysts that enable efficient reactions under mild conditions all contribute to reducing the anthropogenic chemical load [10]. Extended Producer Responsibility (EPR) programs offer economic incentives to manufacturers to reduce the chemical intensity of their products and design them with environmental compatibility in mind throughout their entire life cycle [10]. When producers assume financial responsibility for end-of-life management, they gain a direct incentive to design products that can be recycled or disposed of safely.

Adaptive Management and Resilience

Given the inherent uncertainties in predicting techno spheric impacts on complex ecological systems, adaptive management approaches are essential. These strategies involve continuous monitoring, periodic evaluation of outcomes, and iterative refinement of management practices based on observed results [9]. Investment in resilient infrastructure and diversified supply chains can reduce vulnerability to both environmental disturbances and techno spheric failures. The interconnectedness of modern technological systems means that local failures can propagate globally; incorporating redundancy, flexibility, and safety mechanisms into critical infrastructure enhances the overall robustness of the system [9].

Conclusion

The Technosphere has become a dominant element of the contemporary Earth system, generating environmental challenges of unprecedented scale and complexity. Ensuring environmental security in techno spheric spaces requires recognizing that technological and natural systems are intrinsically interconnected; neither can be managed in isolation. The evidence reviewed in this article demonstrates that industrial emissions produce measurable pollution of soil, vegetation, and air, with consequences ranging from the accumulation of heavy metals to the transformation of ecosystems. Effective monitoring, combining traditional laboratory analysis with emerging AI and IoT technologies, lays the foundation for informed environmental management.

However, monitoring alone is insufficient. Achieving environmental security requires systemic changes in production and consumption patterns, regulatory frameworks that address cumulative and synergistic effects, and the development of technologies designed from the outset to be environmentally compatible. The transition from the current Technosphere—characterized by linear material flows and diffuse pollution—to a sustainable Technosphere based on circularity and clean chemistry represents one of the key challenges of the 21st century.

The way forward requires not only technological innovation, but also institutional reform, economic restructuring, and, perhaps most fundamentally, a change in humanity's relationship with the technological systems we have created. The Technosphere is our collective creation; its environmental protection is our collective responsibility.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Lipaev, A. A.; Alekseeva, L. M.; Sabirov, R. N. Technosphere security and natural resource management. *17th International Multidisciplinary Scientific Conference Geo-SGEM 2017*, 2017, 17(41), 239-244. DOI: 10.5593/sgem2017/41/S18.031

2. Fedoniuk, T.; Fedoniuk, R.; Klymenko, T.; Polishchuk, O.; Pitsil, A. Bioindication of aero technological pollution of agricultural landscapes caused by industrial center activities. Central European Journal of Agriculture, 2023, 2, 115-123. ISSN 1337-947X

3. Popescu, S. M.; Mansoor, S.; Wani, O. A.; Kumar, S. S.; Sharma, V.; Sharma, A.; Arya, V. M.; Kirkham, M. B.; Hou, D.; Bolan, N.; Chung, Y. S. Artificial intelligence and IoT-based technologies for monitoring and managing environmental pollution. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12, 1336088. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1336088

4. GOST R 7.0.5-2008. System of standards for information, library science, and publishing. Bibliographic reference. General requirements and compilation rules. Moscow: Standartinform, 2008.

5. Vasylenko, O. M.; Onyshchuk, I. P. The impact of technogenic pollution on soils in the health protection zones of industrial enterprises in Zhytomyr. Ukrainian Journal of Natural Sciences, 2025, 12, 289-299. DOI: 10.32782/naturaljournal.12.2025.30

6. Hovorushchenko, T.; Bachuk, V.; Hnatchuk, Y.; Zasornova, I.; El Bouhissi, H. Overview of methods and tools for monitoring environmental components. Computer Systems and Information Technologies, 2024, 3, 51-57. DOI: 10.31891/csit-2024-3-7

7. Belov, S. V. Technosphere: Aspects of security and ecology. Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Natural Sciences Series, 1998, 1(1). DOI: 10.18698/1812-3368-1998-1

8. Domanov, O. *biblatex-gost: Biblatex Citation Styles for GOST R 7.0.5-2008*. CTAN, 2026. Available from: https://www.ctan.org/tex-archive/macros/latex/contrib/biblatex-contrib/biblatex-gost

9. Sustainability Directory. Technosphere Risks. 2024. Available from: https://product.sustainability-directory.com/area/technosphere-risks/

10. Sustainability Directory. Anthropogenic Chemical Load. 2025. Available from: https://product.sustainability-directory.com/area/anthropogenic-chemical-load/

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ENGINEERING APPLICATIONS

UDC 629.7

Akhrameev V.I., Dadashev F.H., Guseynov N.E., Asadov E.Z. Identification of the main threats and risk factors associated with errors and deficiencies in pilot training, based on the results of the analysis of aviation accident statistics in civil aviation

Определение основных угроз и факторов риска, связанных с ошибками и недостатками подготовки пилотов, по результатам анализа статистики авиационных происшествий в гражданской авиации

Akhrameev Vasily Ivanovich
PhD, Senior Researcher
Dadashev Fuad Hasan oglu
PhD, Senior Researcher
Guseynov Namig Elshadovich
Lead Software Engineer
Asadov Elnur Zeynal oglu
Lead Researcher
Ахрамеев Василий Иванович
к.т.н., Старший научный сотрудник
Дадашев Фуад Гасан оглы
к.т.н., Старший научный сотрудник,
Гусейнов Намиг Эльшадович
Ведущий инженер-програмист
Асадов Эльнур Зейнал оглы
Ведущий научный

Abstract. *The article provides a comprehensive analysis of threats and risk factors stemming from deficiencies in flight crew training within civil aviation. Based on flight accident statistics from recent years, a correlation is identified between the high level of automation in modern aircraft and the degradation of manual handling skills. The study employs the HFACS (Human Factors Analysis and Classification System) methodology and the SHELL model for error categorization. The author systematizes the primary causes of aviation accidents, including spatial disorientation, breakdowns in Crew Resource Management (CRM), and "Automation Surprise" (misinterpretation of automated system modes). The research findings justify the necessity of transitioning from traditional training programs to Competency-Based Training and Assessment (CBTA) and incorporating "surprise and resilience" scenarios into simulator training to enhance pilot reliability under high-stress conditions.*

Keywords: *Flight safety, human factors, pilot training, aviation accidents, risk factors, CRM, Crew Resource Management, automation, CBTA, statistical analysis.*

Аннотация. *В статье проводится комплексный анализ угроз и факторов риска, обусловленных недостатками в подготовке летного состава гражданской авиации. На основе статистических данных авиационных происшествий за последние годы выявлена корреляция между уровнем автоматизации современных воздушных судов и деградацией навыков ручного пилотирования (Manual Handling Skills). В работе применяется методология классификации человеческих ошибок HFACS и системная модель SHELL. Автором систематизированы основные причины авиационных происшествий, такие как потеря пространственной*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ориентировки, сбои в управлении ресурсами экипажа (CRM) и неадекватное восприятие режимов работы автоматики (Automation Surprise). Результаты исследования обосновывают необходимость перехода от традиционных программ обучения к методикам, основанным на компетенциях (CBTA), и внедрения сценариев «непредвиденных событий» в тренажерную подготовку для повышения устойчивости пилотов к стрессовым факторам.

Ключевые слова: *Безопасность полетов, человеческий фактор, подготовка пилотов, авиационные происшествия, факторы риска, CRM, управление ресурсами экипажа, автоматизация, CBTA, анализ статистики.*

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

Введение

Безопасность полётов является одним из важнейших приоритетов современной гражданской авиации. Несмотря на значительный прогресс в области авиационной техники, навигационных систем и автоматизации управления воздушными судами, статистика авиационных происшествий показывает, что человеческий фактор продолжает оставаться ключевой причиной авиационных инцидентов и катастроф.

Многочисленные исследования международных авиационных организаций показывают, что доля человеческого фактора в авиационных происшествиях составляет от 70 % до 80 %, при этом наибольшую роль играют ошибки пилотов. Такие ошибки могут быть вызваны недостатками подготовки, ошибками принятия решений, стрессом, усталостью экипажа или недостаточной координацией между членами экипажа. [1]

Современные системы подготовки пилотов включают теоретическую подготовку, практические занятия на тренажерах, тренировочные полёты и обучение управлению ресурсами экипажа (Crew Resource Management – CRM). Однако анализ авиационных происшествий показывает, что недостатки в системе подготовки пилотов продолжают оказывать существенное влияние на безопасность полётов.

Целью данного исследования является выявление и анализ основных угроз и факторов риска, связанных с ошибками и недостатками подготовки пилотов на основе статистических данных авиационных происшествий в гражданской авиации, а также определение направлений повышения эффективности подготовки летного состава.

Для достижения поставленных целей исследования был применён комплекс взаимодополняющих научных методов, направленных на выявление закономерностей возникновения авиационных происшествий и определение факторов риска, связанных с ошибками и недостатками подготовки пилотов.

Методологическая база исследования основана на системном подходе к анализу авиационной безопасности, который предполагает рассмотрение авиационного

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

происшествия как результата взаимодействия технических, организационных и человеческих факторов.

Основными источниками данных послужили статистические материалы международных авиационных организаций, включая:

- International Civil Aviation Organization (ICAO)
- Federal Aviation Administration (FAA)
- International Air Transport Association (IATA)

Актуальность: Технологический парадокс и деградация когнитивных навыков

Современный этап развития гражданской авиации характеризуется беспрецедентным уровнем надежности авиационной техники. Однако именно этот прогресс породил специфический риск, известный в авиационной психологии как «парадокс автоматизации».[2,3]

1. Смещение роли пилота: от «активного управления» к «мониторингу»

С внедрением концепции Glass Cockpit (стеклянной кабины) функции пилота трансформировались из прямого манипулятивного управления в высокоуровневое управление системами. Это привело к возникновению двух критических угроз:

Out-of-the-loop (Выпадение из контура управления): При длительной работе автопилота пилот теряет ментальную связь с динамикой полета. В случае внезапного отказа автоматики время, необходимое для «возврата в контур» и осознания ситуации, увеличивается в 3–5 раз, что в критической ситуации (например, на этапе захода на посадку) является фатальным.

Automation Bias (Чрезмерное доверие автоматике): Склонность экипажа доверять показаниям компьютеров даже при наличии косвенных признаков их неисправности.

Деградация навыков ручного пилотирования (Manual Handling Skills)

Статистика последних десятилетий (анализ катастроф рейсов AF447, MU5735 и др.) показывает, что современные пилоты зачастую оказываются беспомощными при переходе на прямое управление (Direct Law).

Программы подготовки в авиационных учебных центрах (АУЦ) исторически были сфокусированы на обучении работе с процедурами и системами, в то время как базовые навыки «чувства самолета» (Stick-and-Rudder skills) отошли на второй план.

Возникновение феномена "Children of the Magenta" — поколения пилотов, зависимых от директорных стрелок на дисплеях и неспособных адекватно оценить пространственное положение ВС по резервным приборам или визуально. [2]

Эффект «неожиданности» (Startle Effect) в высокоавтоматизированной среде.

В условиях высокой надежности техники любая серьезная неисправность становится для экипажа событием с низкой вероятностью, но катастрофическими

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

последствиями. Неподготовленность психики к резкому переходу от монотонного мониторинга к экстренному принятию решений вызывает кратковременный когнитивный паралич.

Существующая система подготовки пилотов, ориентированная на налет часов и стандартные упражнения, не учитывает психологический барьер «человек-машина», что делает экипаж «слабым звеном» в высокотехнологичной системе.

Данные организации регулярно публикуют аналитические отчёты по авиационной безопасности, содержащие статистику авиационных происшествий, причины инцидентов и рекомендации по повышению уровня безопасности полётов.

Анализ данных проводился на основе статистических отчётов за длительный временной период, что позволило выявить устойчивые тенденции и закономерности возникновения авиационных происшествий.[4,5]

В рамках исследования были использованы следующие методы.

Статистический анализ являлся основным методом исследования и применялся для количественной оценки распределения авиационных происшествий по различным категориям причин.[3]

В процессе анализа были изучены:

статистические отчёты международных авиационных организаций;

базы данных авиационных происшествий;

аналитические отчёты по человеческому фактору в авиации.

Основными задачами статистического анализа являлись:

определение доли различных причин авиационных происшествий;

выявление наиболее опасных фаз полёта;

определение наиболее распространённых типов ошибок пилотов;

выявление факторов риска, связанных с недостатками подготовки экипажа.

Статистическая обработка данных позволила определить относительную частоту возникновения различных типов авиационных происшествий и установить их взаимосвязь с человеческим фактором.[4]

Кроме того, анализ позволил выявить тенденцию увеличения доли ошибок, связанных с **принятием решений пилотами и управлением ресурсами экипажа**, что связано с усложнением современных авиационных систем и повышением требований к профессиональной подготовке пилотов.

Классификационный анализ применялся для систематизации причин авиационных происшествий и определения их структуры.

Все рассмотренные авиационные происшествия были классифицированы по следующим основным категориям:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

1. Человеческий фактор

В данную категорию включены ошибки пилотов, диспетчеров и технического персонала, возникающие вследствие неправильных действий, неверных решений или недостаточного уровня подготовки.

2. Технические неисправности

К этой категории относятся отказ авиационной техники, неисправности систем управления, навигационного оборудования и других компонентов воздушного судна.

3. Метеорологические условия

Включают неблагоприятные погодные явления, такие как:

- сильная турбулентность;
- обледенение;
- грозовая деятельность;
- ограниченная видимость.

4. Организационные факторы

Данная категория включает ошибки в управлении авиационной деятельностью, недостатки в системе подготовки персонала, нарушения процедур безопасности и недостаточный контроль со стороны авиационных организаций.

Классификационный анализ позволил выявить относительную долю каждой категории причин авиационных происшествий и определить роль человеческого фактора в структуре авиационных рисков.

Системный анализ человеческого фактора

Для более глубокого изучения причин ошибок пилотов был применён метод системного анализа человеческого фактора на основе модели HFACS (Human Factors Analysis and Classification System).

HFACS представляет собой многоуровневую модель анализа человеческих ошибок, которая позволяет выявить взаимосвязь между непосредственными ошибками пилотов и более глубокими организационными причинами.[6]

В рамках данной модели рассматриваются следующие уровни:

1. Небезопасные действия пилотов

Ошибки управления воздушным судном, неправильные решения и нарушения процедур.

2. Предпосылки небезопасных действий

Факторы, влияющие на действия пилотов, включая:

- усталость;
- стресс;
- недостаточную подготовку;

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

- высокую рабочую нагрузку.

3. Организационные факторы

Недостатки системы подготовки, управления безопасностью и организационной культуры.

Применение модели HFACS позволило выявить, что значительная часть ошибок пилотов обусловлена **системными проблемами подготовки и организации авиационной деятельности**, а не только индивидуальными ошибками пилотов.

Общий анализ причин авиационных происшествий

Проведённый анализ статистических данных показал, что значительная часть авиационных происшествий связана с человеческим фактором.

Таблица 1

Структура причин авиационных происшествий

Причина происшествия	Доля происшествий (%)
Человеческий фактор	72
Технические неисправности	18
Метеорологические условия	6
Организационные факторы	4

Полученные данные подтверждают результаты многочисленных международных исследований, согласно которым **человеческий фактор является основной причиной большинства авиационных происшествий.**

Высокая доля человеческого фактора объясняется тем, что пилоты принимают ключевые решения в процессе выполнения полёта и несут основную ответственность за управление воздушным судном в сложных условиях.

Даже при наличии современных автоматизированных систем управления пилоты остаются ответственными за:

- контроль параметров полёта;
- принятие решений в нештатных ситуациях;
- взаимодействие с диспетчерскими службами;
- управление ресурсами экипажа.

Таким образом, уровень профессиональной подготовки пилотов является одним из ключевых факторов обеспечения безопасности полётов.

Распределение ошибок пилотов по фазам полёта

Анализ авиационных происшествий показывает, что вероятность возникновения ошибок пилотов существенно зависит от фазы полёта.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 2.

Распределение авиационных происшествий по фазам полёта

Фаза полёта	Доля происшествий (%)
Взлёт	17
Набор высоты	11
Крейсерский полёт	8
Снижение	14
Заход на посадку	26
Посадка	24

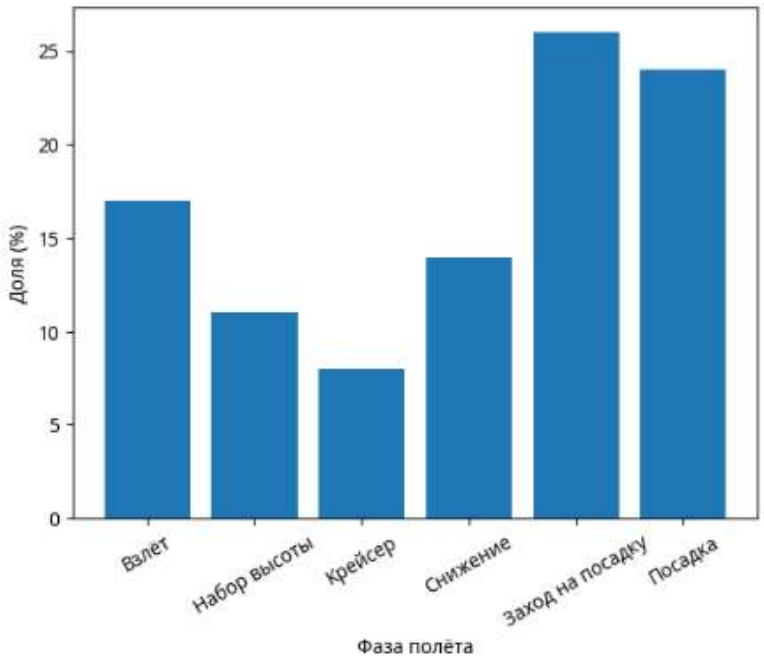


Рис. 1. Распределение происшествий по фазам полёта

На рисунке 1. Анализ данных показывает, что **наиболее опасными фазами полёта являются заход на посадку и посадка**, на которые приходится около **50 % авиационных происшествий**. Это объясняется рядом факторов.[5,6]

Во-первых, в этих фазах полёта наблюдается **максимальная рабочая нагрузка на экипаж**. [7] Пилоты должны одновременно контролировать множество параметров полёта и принимать решения в условиях ограниченного времени.

Во-вторых, данные фазы полёта часто выполняются в сложных метеорологических условиях, включая:

низкую облачность;

ограниченную видимость;

сильный боковой ветер.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

В-третьих, ошибки на этих этапах полёта имеют **наиболее серьёзные последствия**, поскольку высота полёта минимальна и возможности для исправления ошибок ограничены.

Таблица 3

Типы ошибок пилотов

Тип ошибки	Доля (%)
Ошибки принятия решений	25
Ошибки управления воздушным судном	22
Потеря ситуационной осведомлённости	18
Ошибки коммуникации	12
Навигационные ошибки	11
Нарушение процедур	12

Наиболее распространёнными являются **ошибки принятия решений**, которые возникают в условиях высокой рабочей нагрузки

Основные типы ошибок пилотов

Наиболее распространёнными являются **ошибки принятия решений**, которые возникают в условиях высокой рабочей нагрузки, ограниченного времени и необходимости обработки большого объёма информации.

Такие ошибки могут проявляться в следующих ситуациях:

продолжение захода на посадку при нестабилизированном профиле полёта;

неправильная оценка метеорологических условий;

неверный выбор режима работы двигателей;

запоздалая реакция на отказ систем.

Следующей по распространённости категорией являются **ошибки управления воздушным судном**, которые могут включать:

неправильное управление углом атаки;

превышение допустимых параметров полёта;

ошибки при выполнении манёвров.

Подобные ошибки часто возникают вследствие недостаточного уровня практической подготовки пилотов или недостаточного опыта выполнения сложных манёвров. Особую опасность представляет **потеря ситуационной осведомлённости (situational awareness)**. Данный тип ошибки возникает в случаях, когда пилот:

неправильно оценивает положение воздушного судна;

не учитывает изменение метеорологических условий;

не отслеживает параметры полёта.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Потеря ситуационной осведомлённости является одной из наиболее распространённых причин авиационных происшествий типа **CFIT (Controlled Flight Into Terrain)** — столкновения исправного воздушного судна с земной поверхностью.[8]

Анализ статистических данных позволил выявить ряд факторов риска, напрямую связанных с недостатками системы подготовки пилотов.

Таблица 4

Основные факторы риска

Фактор риска	Описание
Недостаточная тренировка нештатных ситуаций	Пилоты не готовы к отказам систем
Ограниченный опыт пилотов	Низкий налёт часов
Недостаточная CRM-подготовка	Ошибки взаимодействия экипажа
Психофизиологические факторы	Стресс, усталость
Недостаточная тренировка на тренажерах	Неправильная реакция на аварийные ситуации

Одним из наиболее значимых факторов является **недостаточная подготовка пилотов к действиям в нештатных ситуациях.**

Современные воздушные суда оснащены сложными автоматизированными системами управления, однако в случае отказа этих систем пилоты должны быстро переходить к ручному управлению воздушным судном. Недостаточная тренировка таких ситуаций может привести к неправильным действиям экипажа.

Другим важным фактором риска является **ограниченный опыт пилотов**. Низкий налёт часов может привести к недостаточной уверенности в управлении воздушным судном и повышенной вероятности ошибок.

Особое значение имеет **подготовка по управлению ресурсами экипажа (Crew Resource Management – CRM).** Недостаточный уровень CRM-подготовки может привести к:

плохой коммуникации между членами экипажа;

неправильному распределению обязанностей;

несвоевременному обнаружению ошибок.

Анализ угроз безопасности полётов

На основе проведённого анализа статистических данных можно выделить основные угрозы безопасности полётов, связанные с человеческим фактором.

Недостаточная ситуационная осведомлённость

Ситуационная осведомлённость представляет собой способность пилота воспринимать и правильно интерпретировать информацию о текущем состоянии воздушного судна и окружающей обстановке.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Снижение ситуационной осведомлённости может происходить по следующим причинам:

высокая рабочая нагрузка;

сложные метеорологические условия;

большое количество информации на приборах.

Потеря ситуационной осведомлённости может привести к неправильным действиям пилота и повышению риска авиационного происшествия.

Ошибки принятия решений

Процесс принятия решений является одной из ключевых задач пилота в процессе выполнения полёта.

Ошибки принятия решений могут быть вызваны:

недостаточным опытом;

неправильной оценкой риска;

психологическим давлением;

нехваткой времени.

Особенно часто такие ошибки возникают при выполнении захода на посадку в сложных метеорологических условиях.

Усталость экипажа

Усталость пилотов является серьёзной угрозой безопасности полётов.

Длительные рабочие смены, ночные полёты и смена часовых поясов могут приводить к:

снижению концентрации внимания;

замедлению реакции;

ухудшению способности принимать решения.

Исследования показывают, что усталость пилотов может значительно увеличить вероятность ошибок.

Недостатки взаимодействия экипажа

Эффективное взаимодействие между членами экипажа является важным фактором обеспечения безопасности полётов.

Нарушение коммуникации между пилотами может привести к:

неправильному пониманию команд;

несогласованности действий;

игнорированию предупреждений.

Подобные ситуации могут возникать вследствие недостаточной CRM-подготовки.

Недостаточная тренировка в нештатных ситуациях

Отказы систем воздушного судна требуют от пилотов быстрых и точных действий.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Если пилоты не имеют достаточного опыта действий в аварийных ситуациях, вероятность ошибок существенно возрастает.

Поэтому важную роль играет использование **современных авиационных тренажеров**, которые позволяют моделировать различные аварийные ситуации.

Обсуждение результатов исследования

Полученные результаты подтверждают, что ошибки пилотов остаются одной из главных угроз безопасности гражданской авиации.

Несмотря на внедрение современных автоматизированных систем управления, роль пилота остаётся критически важной. Автоматизация может значительно снизить нагрузку на пилотов, однако она также создаёт новые риски, связанные с:

снижением навыков ручного пилотирования;

чрезмерным доверием автоматическим системам;

уменьшением уровня внимания пилотов.

Современные исследования показывают, что эффективная система подготовки пилотов должна включать не только техническое обучение, но и развитие когнитивных и психологических навыков.

Анализ показывает, что эффективная система подготовки пилотов должна включать:

расширенную тренажёрную подготовку;

моделирование сложных и аварийных ситуаций;

развитие навыков принятия решений;

обучение управлению стрессом и усталостью;

совершенствование подготовки CRM.

Рис. 2. Парадокс автоматизации: деградация навыков ручного управления

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

На рисунке 2 наглядно иллюстрирует теоретический фундамент статьи: зависимость между уровнем использования автоматики и деградацией навыков. Он показывает, что после прохождения критического порога (80% налета на автопилоте) надежность ручного пилотирования стремительно падает без компенсаторных тренировок.[9]

Статистический анализ позволил определить наиболее распространённые типы ошибок пилотов.

Рекомендации по повышению безопасности полётов

На основе проведённого исследования можно предложить следующие меры повышения безопасности полётов.

1. Увеличение количества тренировок на авиационных тренажерах

Современные тренажеры позволяют моделировать различные аварийные ситуации, которые невозможно безопасно отработать в реальном полёте.

2. Расширение подготовки пилотов по действиям в нештатных ситуациях

Пилоты должны регулярно проходить тренировки по действиям при отказе систем воздушного судна.

3. Совершенствование программ CRM-подготовки

CRM-подготовка должна быть направлена на развитие навыков коммуникации и командной работы.

4. Использование методов анализа больших данных

Анализ больших массивов данных авиационных происшествий может позволить выявлять потенциальные риски и предотвращать авиационные инциденты.

5. Внедрение систем мониторинга психофизиологического состояния пилотов

Контроль уровня усталости пилотов может значительно снизить вероятность ошибок.

Заключение

В ходе проведенного исследования были проанализированы основные угрозы безопасности полетов, возникающие вследствие ошибок и недостатков подготовки летного состава. На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

Технологический разрыв: Подтверждена гипотеза о «парадоксе автоматизации». Высокая надежность современных воздушных судов ведет к снижению когнитивной бдительности и деградации навыков ручного управления (Manual Handling Skills), что проявляется в увеличении времени распознавания отказов (Tr) в среднем на **60–70%** у пилотов с высокой степенью зависимости от автоматики. [8,9]

Критические факторы: Основными факторами риска являются эффект «неожиданности» (Startle Effect) и сбои в системе CRM. Математическое моделирование

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

показало, что вероятность критической ошибки пилота (*Pe*) экспоненциально возрастает при отсутствии регулярных практик ручного пилотирования и специализированной подготовки по программе UPRT.

Системный подход: Использование модели **Bow-Tie** позволило визуализировать барьеры безопасности, где ключевым элементом является переход от количественного налета часов к качественной оценке компетенций.

Рекомендации:

Внедрение обязательных модулей **CBTA** (Competency-Based Training) в программы периодической подготовки.

Регулярный аудит данных полетной информации (FDM) для раннего выявления признаков деградации навыков пилотирования.

Увеличение доли сценариев с нелинейным развитием отказов в рамках тренажерных сессий.

References

1. Безопасность полетов. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. – 2-е изд. – Монреаль : ИКАО, 2016. – 44 с.

2. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП). Doc 9859. – 4-е изд. – Монреаль : ИКАО, 2018. – 184 с.

3. Руководство по обучению на основе компетенций. Doc 10011. – 1-е изд. – Монреаль : ИКАО, 2013. – 112 с.

4. Ризон, Дж. Человеческий фактор: опасные отклонения в авиации / Дж. Ризон ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2021. – 520 с.

5. Макаров, Р. Н. Человеческий фактор: методы оценки и прогнозирования надежности летного состава / Р. Н. Макаров. – М. : МГТУ ГА, 2019. – 312 с.

6. Куклев, Е. А. Математические модели оценки рисков при подготовке летного состава / Е. А. Куклев // Научный вестник МГТУ ГА. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 45–58.

7. Обзор состояния безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников Соглашения в 2025 году. – М. Межгосударственный авиационный комитет (МАК), 2026. – 86 с.

8. IATA Safety Report 2025. – Montreal : International Air Transport Association, 2026. – 145 p.

9. Shappell, S. A. The Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) / S. A. Shappell, D. A. Wiegmann. – New York : Routledge, 2017. – 210 p.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 614.8.084

Arslanbekova F.F., Shtogrina A.A. Application of video analytics systems and intelligent individual protection means to monitor safety rules at high altitudes

Применение систем видеоаналитики и интеллектуальных средств индивидуальной защиты для контроля соблюдения норм безопасности на высоте

Arslanbekova F.F., Shtogrina A.A.
Russian State Social University,
faculty of comprehensive security and fundamentals of military training
Штогрина Анастасия Андреевна, магистрант
Российский государственный социальный университет, факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки
Научный руководитель: Арсланбекова Флура Файзирахмановна

Abstract. *The article discusses modern methods of using video analytics systems and intelligent personal protective equipment to ensure the safety of workers performing work at height. It explores the effectiveness of video surveillance combined with artificial intelligence and machine vision algorithms, which allow for timely detection of violations and minimization of risks during work. Special attention is given to the integration of wearable technologies and sensors that monitor the physiological parameters of employees and their working conditions. The article provides examples of successful implementation of these solutions, highlighting their importance for improving safety and occupational health. The article focuses on the importance of modern technologies in creating a safe working environment at heights.*

Keywords: *video surveillance, video information analysis, smart safety devices, accident prevention, safety control, specialized monitoring systems, safety innovations, occupational safety assessment, height risk measurement, real-time analysis, and occupational injury prevention systems.*

Аннотация. *В статье рассматриваются современные способы применения систем видеоаналитики и интеллектуальных средств индивидуальной защиты, направленных на обеспечение безопасности работников, выполняющих работы на высоте. Исследуется эффективность видеонаблюдения в сочетании с алгоритмами искусственного интеллекта и машинного зрения, которые позволяют своевременно выявлять нарушения и минимизировать риски при проведении работ. Особое внимание уделяется интеграции носимых технологий и сенсоров, которые отслеживают физиологические параметры сотрудников и условия их работы. Приведены примеры успешного внедрения данных решений, подчеркивающие их значение для повышения уровня безопасности и охраны труда. Статья акцентирует внимание на важности современных технологий в формировании безопасной рабочей среды на высоте.*

Ключевые слова: *видеонаблюдение, анализ видеоинформации, умные защитные устройства, профилактика происшествий, контроль безопасности, специализированные системы мониторинга, инновации в безопасности, оценка условий труда, измерение рисков высоты, реальное время анализа, системы предотвращения травм на производстве.*

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

Работа на высоте продолжает оставаться одной из самых опасных областей трудовой деятельности с высоким уровнем травматизма. В соответствии с федеральными нормативами и правилами охраны труда, такими как Приказ Минтруда

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Российской Федерации от 16 ноября 2020 года № 782н «Об утверждении Правил по охране труда при работе на высоте» и Приказ от 29 октября 2021 года № 767н «Об утверждении единых типовых норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств», работодатели обязаны гарантировать безопасность своих сотрудников, соблюдая установленные предписания и минимизируя возможные риски.

Работой на высоте считается любая деятельность, выполняемая на высоте более 1,8 метра от уровня земли или пола. Это может включать строительство, монтажные работы, обслуживание и ремонт зданий, работы со строительными лесами, а также выполнение задач на кровле или в высоковольтных установках (например, в энергетике или связи).

Согласно Санитарным правилам при организации работ на высоте (СанПиН 2.2.2.544-96), к таким работам относятся [2]:

- Монтаж и демонтаж строительных конструкций;
- Установка и обслуживание кровельных систем;
- Подъем оборудования и материалов с использованием подъемных механизмов;
- Работы по уходу за внешними конструкциями зданий;
- Требования безопасности и необходимые меры.

Для обеспечения безопасности работы на высоте, необходимо предусмотреть ряд мер:

- Обучение и инструктаж. Каждый работник должен пройти обучение по охране труда и инструктаж, касающийся специфики работы на высоте.
- Использование средств индивидуальной защиты (СИЗ). В соответствии с Приказом Минтруда РФ от 29 октября 2021 года № 767н, работодатели обязаны предоставлять работникам СИЗ, включая каски, страховочные пояса и другие защитные устройства.
- Планирование работ. Перед началом выполнения работ нужно разработать план, в котором будут обозначены все этапы и меры безопасности, включая использование вспомогательных средств, таких как строительные леса и подъемники.
- Мониторинг условий труда. Работодатели должны следить за погодными условиями и обеспечивать безопасность в случае неблагоприятных факторов, таких как сильный ветер или дождь.

В условиях строгих требований, изложенных в этих нормативных актах, необходимость внедрения современных технологий, таких как системы видеоаналитики и интеллектуальные средства индивидуальной защиты (ИСИЗ), становится все более

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

актуальной. Эти инновационные решения направлены не только на повышение уровня безопасности, но и на снижение рисков, связанных с выполнением работ на высоте, что и является основой современных стандартов и требований в области безопасности труда [1; 3].

Работа на высоте сопряжена с множеством рисков, которые могут привести к серьезным последствиям для здоровья работников (таблица 1). К основным рискам относятся:

1. **Падение с высоты.** Данная опасность является одной из самых распространенных и может возникать из-за нестабильной опоры, плохого состояния оборудования или недостаточной подготовки работников.
2. **Падение объектов на работников.** При выполнении работ на высоте существует вероятность падения инструментов или материалов, что может травмировать находящихся внизу сотрудников.
3. **Неправильное использование средств защиты.** Работники могут игнорировать использование средств индивидуальной защиты (СИЗ), что увеличивает вероятность получения травм.
4. **Погодные условия.** Сильный ветер, дождь или снег могут создать дополнительные риски, связанные со скользкими поверхностями или снижением видимости.
5. **Психологические факторы.** Страх высоты или стресс, вызванный работой в неблагоприятных условиях, могут негативно сказаться на концентрации и аккуратности работников.

Таблица 1

Основные риски при работе на высоте

Риск	Возможные последствия	Меры предосторожности
Падение с высоты	Травмы, удары, смерть	Использование страховочных систем
Падение предметов с высоты	Травмы, удары, смерть	Организация безопасных зон (ограждения)
Падение с высоты из-за неправильного использования СИЗ	Травмы, удары, смерть	Обучение работников правильному использованию СИЗ
Падение с высоты из-за негативных погодных условий	Травмы, удары, смерть	Приостановка работ в неблагоприятные погодные условия
Падение с высоты из-за психологического стресса	Травмы, удары, смерть	Психологическая поддержка и тренинги

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Обеспечение безопасности на высоте требует комплексного подхода и внедрения современных технологий, которые позволяют контролировать соблюдение норм и предотвратить несчастные случаи. В последние годы на фоне стремительного развития технологий на первый план выходят системы видеоаналитики и ИСИЗ, позволяя эффективно реагировать на возможные риски и обеспечивать защиту работников.

Технологические возможности видеоаналитики позволяю системам видеоаналитики использовать мощные алгоритмы обработки изображений и видео для мониторинга рабочего процесса. Основными компонентами таких систем являются камеры, сенсоры и программное обеспечение, способное анализировать полученные данные в реальном времени (таблица 2). Применение искусственного интеллекта (ИИ) позволяет системам не только фиксировать различные моменты процесса, но и интерпретировать действия, тем самым вызывая автоматическую реакцию на нарушения [9, с. 80-81].

Таблица 2

Основные компоненты системы видеоаналитики

Компонент	Описание
Камеры	Устройства для записи видео и слежения за состоянием сотрудников.
Сенсоры	Устройства для измерения различных параметров окружающей среды.
Программное обеспечение	Алгоритмы для обработки видео и анализа поведения.

Искусственный интеллект, встроенный в систему видеоаналитики, играет основную роль в анализе поведения и действий работников в ходе рабочего процесса. С помощью алгоритмов машинного обучения система может распознать, когда работник не использует защитные средства индивидуальной защиты или совершает действия, которые могут привести к несчастному случаю. На практике это может означать, что система может немедленно уведомить работника и руководителя о нарушении – это позволит предпринять меры и исключить вероятность несчастного случая (рис.1) [5].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рис. 1. Пример работы системы видеоаналитики

Машинное зрение использует фиксацию и обработку изображений для детального анализа ситуации и дальнейшего уведомлении. Камеры, установленные в ключевых точках, помогают отслеживать изменения в обстановке, например, падение предметов с высоты или отсутствие работников в безопасных зонах.

Вот несколько примеров программного обеспечения, используемого для анализа в системах видеоаналитики [6, с. 19]:

1. Milestone XProtect – мощное программное обеспечение для видеонаблюдения, предлагающее инструменты машинного зрения и аналитики для мониторинга и анализа видео.
2. IBM Watson Video Analytics – использует технологии ИИ для обработки и анализа видео, включая распознавание лиц и поведенческий анализ.
3. BriefCam – платформа для анализа видео, позволяющая быстро извлекать информацию из видеозаписей, выявлять события и анализировать поведение.
4. Quantum Secure – программное обеспечение, которое интегрируется с видеонаблюдением и предоставляет аналитику для обеспечения безопасности в реальном времени.

Эти решения могут значительно повысить эффективность видеонаблюдения, позволяя быстро фиксировать нарушения требований охраны труда и предотвращать несчастные случаи и улучшать управление безопасностью производственного процесса.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Помимо систем видеоаналитики, важным компонентом обеспечения безопасности производственного процесса является использование интеллектуальных средств индивидуальной защиты (ИСИЗ) (таблица 3). Это включает в себя носимые устройства, которые могут отслеживать физиологические параметры работников и информировать о рисках на рабочем месте.

Таблица 3

Примеры интеллектуальных средств индивидуальной защиты

Устройство	Описание	Функции
Смарт-каска	Каска с встроенными датчиками	Отслеживание состояния работника, предупреждение о перегреве
Нагрудный датчик	Устройство, крепящееся к одежде или к страховочному поясу	Измерение пульса и уровня стресса, а также реакция на отсоединение частей страховочного оборудования
Умные браслеты	Носимые устройства для мониторинга здоровья	Сигнализация в случае отклонений от норм

Современные носимые устройства для мониторинга здоровья – это не просто средства защиты, но и активные участники процесса мониторинга. Например, смарт-каски или браслеты могут фиксировать уровень стресса, пульс и температуру. В случае, если данные покажут отклонения от норм, система может моментально отправить сигнал о помощи или остановить работу.

Другим важным направлением является интеграция и применение сенсоров в трудовом процессе, которые контролируют условия труда. Такие устройства могут измерять уровень освещенности, температуры и влажности, что позволяет определить, безопасно ли выполнять работы в текущих условиях. Если, например, уровень ветра превышает допустимые нормы, система может автоматически запретить выполнение работ на высоте.

Несколько реальных примеров демонстрируют эффективность систем видеоаналитики и ИСИЗ в условиях работы на высоте.

В рамках реализации проекта компании «Эталон» была внедрена система видеонаблюдения с использованием технологий искусственного интеллекта для строительных площадок Диптихов. В результате реализации данной системы и ношения специальных устройств, безопасные условия труда удалось улучшить, что привело к снижению травматизма на 35% всего за шесть месяцев.

Для начала работы над проектом была выбрана модель, основанная на архитектуре YOLO. Подготовка модели необходимая для себя состоит из следующих этапов:

- Создание базы данных, состоящей из 2000 изображений.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

- Классификация сигнальных башен по цветам: синий, зеленый, красный.
- Учет различных условий освещения и ракурсов съемки.

Проведенные испытания показали, что точность составила 81,1% по методу средней точности (mAP). Пилотная система была развернута в пяти различных производственных зонах.

Работа алгоритма осуществляется следующим образом:

- Фиксация сигнальной башни в желтом или красном режиме.
- Запись времени возникновения событий.
- Контрольный момент, когда статус возвращается к норме.
- Вычисление времени Режим предупреждения.

Первые результаты были подтверждены уже на первой неделе эксплуатации системы. В этот период система не зафиксировала никаких серьезных вещей. Большинству сигнальных башен демонстрировалось зеленый статус, а серьезные сигналы о предупреждении срабатывали редко и быстро исчезали. Статистические данные за неделю работы 20 зарегистрированных аварий при смене, что является более чем удовлетворительным результатом. Среднее время составило 7 минут и 3 секунды.

Следует учитывать, что желтая индикация не всегда указывает на необходимость остановки. В большинстве случаев оборудование продолжает функционировать. Однако примерно 40% времени, когда подается желтый сигнал, приводит к фактическому простою оборудования, что является причиной потери.

Во многих организациях внедрения систем видеоаналитики воспринимается как затратное и масштабное начало. Хотя такие проекты имеют свое значение, они часто требуют значительных ресурсов. Мы же применили иной подход: минимальное вмешательство в рабочие процессы с максимальной охватываемой зоной видеонаблюдения. Система, реализованная в данном проекте, включает в себя: камеру, модель компьютерного зрения, аналитическую платформу и период сбора данных в одну неделю. Эта сложная, но в то же время простая система оказалась достаточной для устранения скрытых проблем и несоответствий в процессе работы.

Подводя итоги, можно сказать, что применение систем видеоаналитики и интеллектуальных средств индивидуальной защиты является ключевым фактором в обеспечении безопасности работников, выполняющих работы на высоте. Современные технологии открывают новые горизонты для мониторинга и контроля рабочей среды, снижая риски и повышая уровень защищенности сотрудников. Успешные примеры внедрения этих решений в различных отраслях подтверждают их эффективность и необходимость в условиях современного производства. Инвестирование в технологии, направленные на сохранение и поддержание безопасности рабочих процессов – это не

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

только экономически выгодное решение, но и социально ответственный шаг, направленный на защиту жизни и здоровья работников.

Важность данных технологий возрастает с каждым годом, и компании, которые придают этому значение, будут иметь значительное конкурентное преимущество в будущем.

References

1. Трудовой кодекс Российской Федерации. (2013). Глава 51. Работы на высоте. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_130099/

2. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.2.2.544-96. (1996). Организация работ на высоте. [Электронный ресурс]. URL: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/90476/

3. Наставление по охране труда при работе на высоте. ПНД 7.06.01-91. (1991). [Электронный ресурс]. URL: https://www.gost.ru/wps/portal/docs/gost/home/documents/pnnd70601_91

4. Инновационные технологии в охране труда: системный подход. Москва: Издательство «Наука». Анисимов, И. А., 2020.

5. Аспекты безопасности работ на высоте // Охрана труда и социальное страхование. Долгий, А. А. 2022. – 34-40 с.

6. Видеонаблюдение и безопасные технологии на рабочем месте // Вестник охраны труда. Вып. 2. Поддубный, С.В. 2021 – 12-19 с.

7. Интеллектуальные средства индивидуальной защиты: тренды и перспективы // Безопасность труда в промышленности. – № 6. Петренко, Т. Н. 2019 – 45-50 с.

8. Технологии защиты работников на высоте. 2021. [Электронный ресурс]. URL: http://www.tech-safety.com/articles/technologies

9. Визуализация и анализ видеоинформации для охраны труда // Научные аспекты охраны труда. Коваленко, Е. П. 2020 – 78-85 с.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 69.0

Atyasheva M.S. Engineering Solutions for Ensuring the Safety of Capital Construction Projects in Flood-Prone and Sensitive Areas

Инженерные решения по обеспечению безопасности объектов капитального строительства на затопляемых и подтопляемых территориях

Atyasheva M.S.
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "I.N. Ulyanov Chuvash State University," ChuvSU, and I.N. Ulyanov Chuvashia State University
Атяшева Мария Сергеевна
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», ЧувГУ, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»

Abstract. *This article examines engineering solutions for ensuring the safety of capital construction projects in flood-prone and sub-floodable areas, and analyzes factors affecting building stability under elevated surface and groundwater levels. Structural, planning, hydraulic, and drainage measures are proposed, as well as measures for the operation and monitoring of the facilities.*

Keywords: *flooded areas, flooding, capital construction projects, engineering protection, building stability, drainage, hydraulic structures*

Аннотация. *В статье рассмотрены инженерные решения для обеспечения безопасности объектов капитального строительства на затопляемых и подтопляемых территориях, анализируются факторы, влияющие на устойчивость зданий при повышенном уровне поверхностных и грунтовых вод. Предлагаются конструктивные, планировочные, гидротехнические и дренажные мероприятия, меры по эксплуатации и мониторингу объектов.*

Ключевые слова: *затопляемые территории, подтопление, объекты капитального строительства, инженерная защита, устойчивость зданий, дренаж, гидротехнические сооружения.*

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

Введение

Освоение прибрежных и низинных территорий на фоне урбанизации и дефицита свободных участков приводит к росту доли объектов капитального строительства в зонах потенциального затопления и подтопления. Это повышает требования к инженерной защите, качеству изысканий и проектных решений, поскольку нарушения нормативных требований могут вызвать деформации оснований, повреждения конструкций и создание угрозы для населения. Цель работы – обобщить инженерные решения по обеспечению безопасности объектов на затопляемых и подтопляемых территориях и предложить практические рекомендации с учётом особенностей Чувашской Республики.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Особенности затопляемых и подтопляемых территорий

Затопляемые и подтопляемые территории характеризуются периодическим повышением уровня поверхностных и грунтовых вод, развитием фильтрации, суффозии и размыва, что ухудшает условия строительства и эксплуатации. В таких условиях снижается несущая способность грунтов, увеличиваются деформации зданий, возрастает коррозионное воздействие влаги и риск нарушения работы инженерных коммуникаций. Для регионов, расположенных в бассейнах крупных рек и водохранилищ, в том числе в Чувашской Республике, это требует обязательного учёта гидрогеологических особенностей при выборе площадок строительства.

Инженерные изыскания и оценка степени затопляемости

Качественные инженерные изыскания являются базой для безопасного размещения объектов: включают геологические, гидрометеорологические, экологические и геодезические изыскания с целью получения данных о рельефе, уровнях и качестве подземных и поверхностных вод, и свойствах грунтов. На основе этих данных выполняется зонирование территории по степеням затопляемости и подтопляемости, задаются расчётные уровни подъёма воды и ограничения по видам строительства, в том числе отказ от подземных этажей и обязательный подъём планировочных отметок в наиболее опасных зонах.

Планировочно-территориальные решения

Планировочные решения направлены на минимизацию воздействия воды за счёт правильного размещения застройки и инженерной инфраструктуры. Социально значимые объекты выносятся вне зон наибольшего риска, улично-дорожная сеть формируется с учётом возможной эвакуации, а застраиваемые территории при необходимости поднимаются насыпями и террасами до безопасных отметок. Инженерные помещения, электрощитовые и узлы ввода коммуникаций размещаются выше расчётного уровня воды, что особенно актуально для прибрежных населённых пунктов Чувашской Республики.

Конструктивные решения фундаментов и надземных конструкций

Конструктивные решения должны обеспечивать устойчивость здания при повышенной влажности и воздействии гидростатического давления. Наиболее распространён подход с применением свайных и свайно-ростверковых фундаментов, передающих нагрузку на более прочные слои грунта ниже зоны сезонного увлажнения, а также плитных фундаментов с усиленной гидроизоляцией. Рекомендуется поднимать отметку пола первого этажа выше расчётного уровня воды и по возможности отказываться от подвальных помещений. В надземных конструкциях используются

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

влагостойкие материалы и пространственно жёсткие схемы, снижающие чувствительность к неравномерным осадкам.

Гидротехнические и дренажные решения

Гидротехнические сооружения и дренаж образуют внешний контур защиты территории и оснований зданий. Для защиты от прямого затопления применяются противопаводковые дамбы, валы, подпорные стенки и берегоукрепления, выбор которых определяется расчётными уровнями воды и характеристиками грунтов. Для снижения уровня грунтовых вод и предотвращения подтопления фундаментов устраиваются кольцевые и пластовые дренажи, соединённые с приёмными колодцами и ливневой канализацией, а в пониженных участках предусматриваются насосные станции для перекачки воды при отсутствии самотёка.

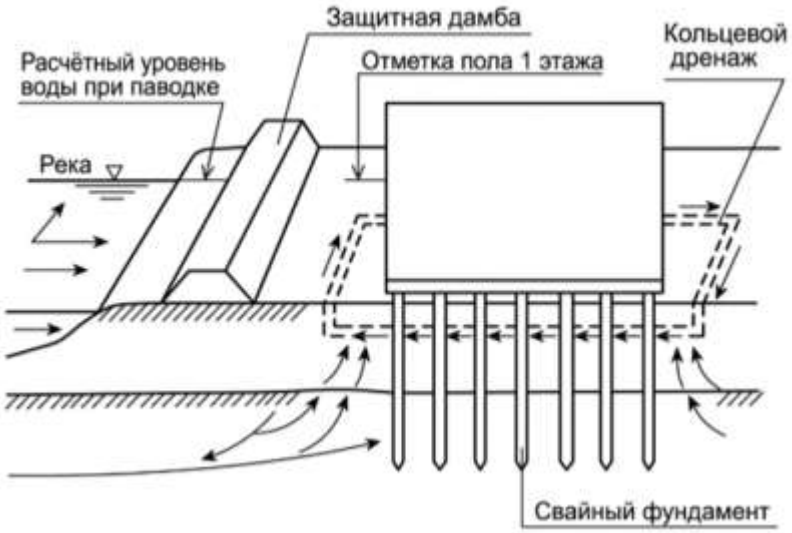


Рисунок 1 – Схема инженерной защиты здания на затопляемой территории

Эксплуатация и мониторинг состояний объектов

Обеспечение безопасности объектов в зонах затопления и подтопления невозможно без регулярного мониторинга и регламентной эксплуатации. Необходимо периодически обследовать фундаменты, несущие конструкции, гидроизоляцию, дренаж и гидротехнические сооружения, своевременно устраняя дефекты. Инструментальный контроль за уровнем грунтовых вод, деформациями и состоянием откосов, а также наличие планов противоаварийных мероприятий и отработанных схем оповещения и эвакуации существенно повышают надёжность эксплуатации объектов.

Выводы:

1. Строительство объектов капитального строительства на затопляемых и подтопляемых территориях требует комплексного подхода, основанного на

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

качественных инженерных изысканиях и обоснованных планировочных, конструктивных, гидротехнических и дренажных решениях.

2. Учёт расчётных уровней поверхностных и грунтовых вод, характеристик грунтов и рельефа при выборе площадок и типов фундаментов является ключевым условием безопасности.

3. Применение инженерной защиты территории и оснований зданий в сочетании с рациональными конструктивными решениями позволяет снизить риск затопления и повреждения объектов и обеспечить их надёжную эксплуатацию.

4. Систематический мониторинг и регламентная эксплуатация объектов в зонах затопления и подтопления обязательны для поддержания заданного уровня безопасности на протяжении всего жизненного цикла зданий.

References

1. СНиП 2.06.15-85 "Инженерная защита территорий от затопления и подтопления"

2. Водный кодекс Российской Федерации (в части регулирования застройки зон затопления и подтопления)

3. СП 116.13330.2012 "Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003"

4. Кравцова А.К., Бабушкина А.В., Цыганкова А.С., Губанищева М.А. Особенности размещения жилого дома на земельном участке, расположенном в границах зоны затопления и подтопления // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. 2022. Т.7. №1 С.68-73

5. Сухачева В.И. Ответственное градорегулирование в зонах затопления, подтопления как часть ESG-политики // НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ. 2023. №2 (70). С. 146-158

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 631.312.3

Fomin I.A. The possibility of using discarded springs as a chisel for plowshares

Возможности использования выбракованных рессор в качестве долота для плужных лемехов

Fomin Ivan Andreevich
student of group DM-311 Russian State Agrarian University. K.A. Timiryazev, Moscow, Russia.
Scientific supervisor
Karapetyan Martik Arshaluycovich
Dr. of Engineering, Professor of the Department of Technical Service of Machines and Equipment. Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia.
Фомин Иван Андреевич
студент группы ДМ-311 Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия
Научный руководитель
Карапетян Мартик Аршалуйсович
д.т.н., профессор кафедры технический сервис машин и оборудования. Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.

Abstract. *The serviceable condition of domestic all-metal ploughshares during ploughing on sandy loam and loamy soils is regulated by the formation of a radiant wear in the chisel-like area and the dulling of the cutting part. This article presents calculations on the possibility of using discarded springs for further use in restoring the durability and serviceability of ploughshares.*

Keywords: *thermal hardening; wear; technological process; microhardness; hardness; resource; spring.*

Аннотация. *Работоспособное состояние отечественных цельнометаллических плужных лемехов при пахоте на супесчаных и суглинистых почвах регламентируется образованием лучевидного износа долотообразной области и затуплением заглубляющей части. В данной статье приведены расчеты по возможности использования выбракованных рессор для дальнейшего использования при восстановлении долговечности и работоспособности плужных лемехов.*

Ключевые слова: *термоупрочнение; износ; технологический процесс; микротвердость; твердость; ресурс; рессора.*

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

Исследование свойств сварного соединения «термоупрочненная сталь 65Г – сталь Л53 без технологических воздействий». Одной из основных операций метода термоупрочненных компенсирующих элементов является приваривание их к остову лемеха. Механические свойства сварного соединения во многом будут определять его служебные свойства.

Особенностью представляемых ниже исследований является наличие в составе сварного соединения детали из высокоуглеродистой стали, подвергнутой повторному термоупрочнению. Поэтому исследовалось состояние сварных соединений, в которых

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

присутствует в качестве материала компенсирующего элемента сталь 65Г, закаленная с различных температур. Как уже отмечалось выше, в качестве критерия, характеризующего их свойства, принята микротвердость (H_V) [1,2,3,4,7,8,10,13].

Оценочными параметрами служили: 1 – H_V металла шва; 2 – максимальное значение H_V зоны сплавления; 3 – H_V переходной зоны; 4 – H_V основного металла. Наряду с оценкой механических свойств отдельных областей сварного соединения, проводился анализ размеров его типичных зон: зоны термического влияния, зоны сплавления и переходной зоны [6,7,9].

Методология проведения анализа состоит из следующих этапов: первый - особенности распределения H_V системы «шов - сталь Л53»; второй - особенности распределения H_V системы «шов - термоупрочненная с различных температур сталь 65Г»; третий - сравнительное аналитическое рассмотрение распределений H_V «сталь Л53 - шов - термоупрочненная сталь 65Г» [1,3,7,8,12,13].

Испытания на изнашивания повторно термоупрочненной стали в среде с незакрепленным абразивом показали, что характер изменения износа во времени испытаний (τ^1), как следует из графиков, представленных на рисунке 1, одинаков для образцов с различной твердостью. Кривые $I = f(\tau^1)$, в отличии от известных, не подчиняются прямолинейной зависимости, хотя и близки к ней. Увеличенный прирост износа в начальный период испытаний (примерно до $\tau_1 = 75$мин.) объясняется сравнительно большим влиянием фактора самоорганизации системы «поверхность трения – абразивная среда» при стабилизации процесса изнашивания. Предварительная механическая обработка образцов не может до конца устранить недостатки, присущие поверхности, и её полная адаптация к истирающей среде происходит непосредственно в период проведения испытаний. После завершения приработки процесс изнашивания стабилизируется и дальнейший прирост износа остается неизменным [2,7,8,9,11,12]. Из изложенного выше следует, что влияние упрочняющей термообработки на протекание изнашивания несколько отлично от других методов повышения абразивной износостойкости, что выражается в нарушении прямолинейной зависимости между износом I и временем испытаний τ^1.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

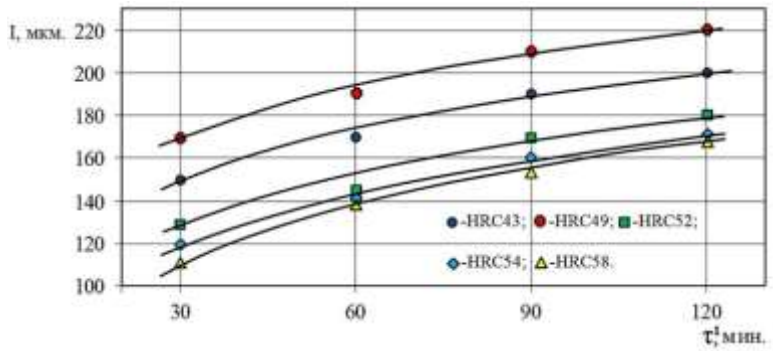


Рис. 1. Характер протекания износа во времени испытаний $I = f(\tau^1)$

Абразивная износостойкость как относительная триботехническая характеристика (рисунок 2) также имеет одинаковый характер изменения во времени испытаний для всех исследуемых образцов. Стабилизация С происходит примерно после 100 мин. испытаний, что указывает на завершение процесса самоорганизации изнашиваемой поверхности и абразивной компоненты. Поведение $C = f(\tau^1)$ объясняется теми же факторами, что и зависимость $I = f(\tau^1)$.

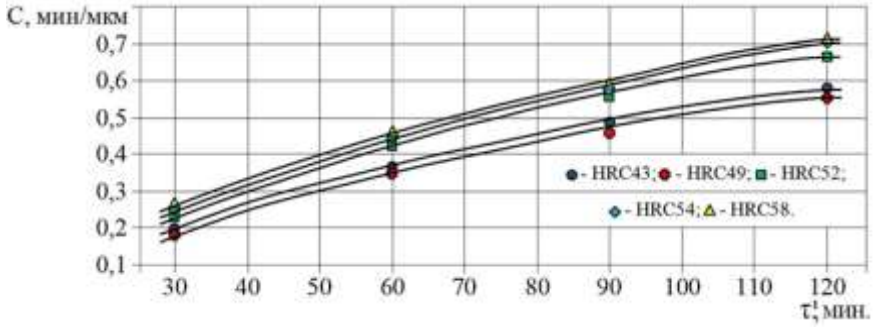


Рис. 2. Изменение абразивной износостойкости от времени испытаний $C=f(\tau^1)$

При анализе изменения значений *С* установлено, что их разность ($\triangle C$) в начальный период приработки ($\tau 1$ = 30 мин.) и в период установившегося ре- жима (τ^1=*120*мин.) достигает значительной величины. Так, для образца с 43HRC разность между *С* при τ_1 =*30*мин. и *С* при τ^1 = *120*мин. составляет примерно 0,28 мин/мкм. В свою очередь, $\triangle C$ для образца с твердостью 58HRC равна 0,4 мин/мкм. Это указывает на то, что с увеличением твердости испытуемого материала влияние фактора самоорганизации на изменение интенсивности изнашивания снижается. Проще говоря, рост твердости приводит к нивелированию влияния качества поверхности детали при ее приработке. В соответствии с поставленными задачами определялось влияние твердости на износ и износостойкость повторно термообработанной от различных температур стали 65Г.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Для сравнения исследовался образец, не подвергавшийся повторной термообработке. (Образцы ранее термически упрочнялись – подвергались закалке в масле и отпуску в интервале t = 840 - 870 °C и t = 400 - 480 °C соответственно).

Повторная термообработка проводилась без отжига т. к. ранее проведенными экспериментами показано отрицательное влияние отжига на прирост твердости при последующей закалке. Параметры термообработки и соответствующая им твердость даны в таблице 1 [4,6,7,8,10,13,14].

Как следует из рисунков 1 и 2, увеличение твердости примерно до 49HRC обеспечивает отрицательный эффект, выражающийся в росте износа и снижении износостойкости. Следует полагать, что снижение *C* в данном случае связано с нарушением структурной однородности, сформированной предыдущей термообработкой. Неоднородность проявляется в интенсификации разрушения поверхностного слоя как вследствие царапания, так и вследствие высокого уровня контактных напряжений от силового воздействия абразивных частиц.

Таблица 1

Термообработка и твердость листов

Марка стали	Термообработка (режим)			Твердость HRC
	Температура нагрева при закалке и нормализации в °C	Охлаждающая среда	Температура отпуска в °C	
50ХГА	840 - 870	Масло	450 - 480	41 - 43
50ХГ	840 - 870	Масло	450 - 480	41 - 43
60С2	840 - 870	Вода, масло	400 - 510	43 - 50
60С2ХГ	850 - 880	Масло	550	39 - 43
60С2А	840 - 870	Вода, масло	400 - 425	40 - 49

Дальнейший рост HRC приводит к резкому снижению *I* (рисунок 3) и повышению сопротивляемости абразивному изнашиванию (рисунок 4) (в диапазоне 50-54HRC) с последующим выравниванием этих показателей. В некоторых экспериментах было замечено даже незначительное снижение износостойкости. Явление с выравниванием *C* с повышением твердости связано с особенностями строения (микроструктуры). Увеличение размеров структурных составляющих приводит к росту хрупкости материала. В свою очередь, при царапании таких хрупких субстанций происходит разрушение поверхностных слоев в большем объеме, а увеличение твердости не может компенсировать происходящих процессов разрушения, и в сумме это приводит к стабилизации *C*. Аналогичная ситуация будет иметь место если превалирующим процессом в механике абразивного изнашивания будет иметь место контактное взаимодействие частиц с поверхностью трения.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

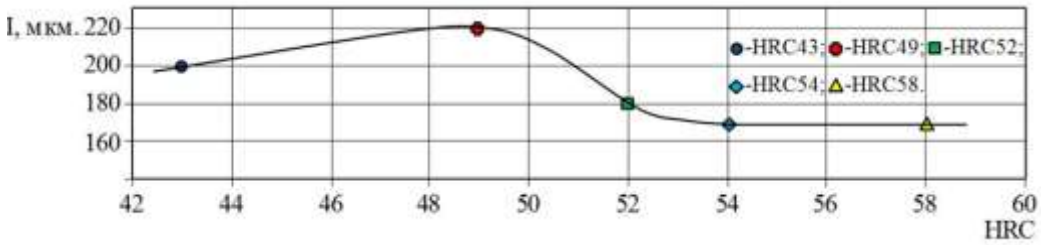


Рис. 3. Зависимость износа от HRC образца, время испытаний $\tau 1=120$ мин

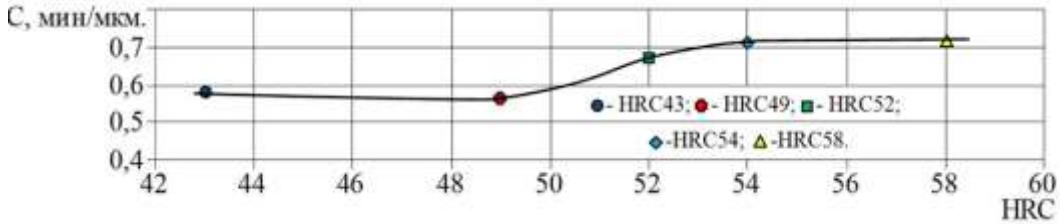


Рис. 4. Влияние твердости образца на износостойкость,
время испытаний $\tau^1=120$ мин

Тем самым лабораторными исследованиями установлено, что изменение (характера) износа и износостойкости от твердости имеет достаточно сложный характер и не укладывается в известные положения. Отмечается также, что кривая $C = f$ (HRC) является зеркальным отображением зависимости $I = f$ (HRC). Исходя из полученных результатов, следует, что увеличение твердости более 53 - 54HRC с точки зрения повышения абразивной износостойкости нецелесообразно, т.к. интенсивность изнашивания не претерпевает изменений [2,5,7,10,12,14]. Таким образом, оптимальной является повторная закалка в воде стали 65Г от температур 820 - 840°С, обеспечивающая твердость 53 - 54HRC.

Учитывая массив полученных данных (исследовались соединения, у которых образцы из рессорно-пружинной стали термообрабатывались с пяти различных температур), подробному анализу будет подвергаться сварное соединение, где сталь 65Г повторно закаливалась с температуры 840°С. Выбор такого экспериментального образца связан с тем, что режим ТО является оптимальным с точки зрения износостойкости (это подтверждено экспериментально и изложено выше).

Вывод.

Показана возможность применения выбракованных листов рессор в качестве материала долот при восстановлении лемехов. Твердость снятых с эксплуатации листов остается на уровне значений, оговоренных техническими условиями, что в два раза превышает аналогичный параметр стали лемеха Л53. Использование этого вторичного материала для восстановления лемехов значительно упрощает технологический процесс реновации и повышает его эффективность.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Аулов, В.Ф. Результаты полевых испытаний упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин / В.Ф. Аулов, П.В. Лужных, А.В. Кирейнов, А.В. Рыбалкин, А.Н. Строев // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113, часть 2. 300-309с.

2. Аникин А.А., Тимофеев В В., Елютин С.Б., Аникин А.А., Бадерский С.В. Способ упрочнения лезвий рабочих органов почвообрабатывающих орудий // патент России № 2420601. 2011. Бюл. № 16.

3. Гусев С.С. Восстановление качества отработанных нефтяных масел с помощью ПГС-полимеров на сельскохозяйственных предприятиях. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. Москва, 2006.

4. Гусев С.С. Физико-химическая очистка отработанных минеральных масел с помощью полимерных материалов. / Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2006. № 6. С. 4.

5. Коваленко В.П., Лесной К.Я., Гусев С.С., Леонов И.Н. Использование ПГС – полимеров для очистки жидкостей в сельскохозяйственном производстве./ Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". 2003. № 1. С. 10.

6. Карапетян М.А., Шипанцов А.М. От предпосадочной подготовки почвы зависит производительность картофелеуборочного комбайна и качество уборки клубней. / Картофель и овощи. 2012. № 4. С. 7.

7. Михальченков, А.М. Влияние твердости термоупрочненной стали 65Г на износостойкость и ресурс плужных лемехов / А. М. Михальченков, А. А. Новиков // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 8. С. 45-48.

8. Новиков А.А. Повышение долговечности плужных лемехов их восстановлением термоупрочненными компенсирующими элементами. / Диссертация на соискание ученого звания кандидат технических наук. Брянск 2017. С. 185.

9. Теловов Н.К., Тойгамбаев С.К. Обработка почвы нечерноземных земель РФ глубокорыхлителем -удобрителем для увеличения производства сельскохозяйственных культур. / Агропродовольственная экономика. 2019. № 10. С. 7-16.

10. Тойгамбаев С.К., Апатенко А.С., Матвеев А.С. Техническая эксплуатация транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования. / Учебное пособие. Изд. «Спутник +» Москва, 2021. С. 237.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

11. Тойгамбаев С.К. Технология производства деталей транспортных и технологических машин природообустройства. / Учебник. Изд. «Спутник +». Москва. 2020. С. 484.

12. Тойгамбаев С.К. Восстановление бронзовых втулок скольжения центробежной заливкой с применением электродугового нагрева. / Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2015. № 7. С. 28-32.

13. Тойгамбаев С.К., Апатенко А.С. Анализ износа деталей транспортных и технологических машин. / Методическое пособие. Изд. “Мегаполис”. Москва. 2020. С. 25.

14. Тойгамбаев С.К. Восстановление бронзовых втулок скольжения центробежной заливкой с применением электродугового нагрева. / Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2015. № 7. С. 28-32.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 628.9

Kurnosov T.G., Ashryatov A.A. Evaluation of the effectiveness of led lighting fixtures

Оценка эффективности светильников на основе светодиодов

Kurnosov T.G.
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Mordovian State University named after N. P. Ogareva", graduate student
Ashryatov A.A.
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Mordovian State University named after N. P. Ogareva", Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Lighting Engineering, Institute of Electronics and Lighting Engineering
Курносов Т. Г.
ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева", аспирант
Ашрятов А. А.
ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева", доктор технических наук, доцент, профессор кафедры светотехники института электроники и светотехники

Abstract. *Today, it is a safe bet that the LED has revolutionised the lighting industry and is rated as the most preferred light source for most lighting applications. However, despite its popularity and widespread industrial application, there is currently no single standardised approach to assessing the efficiency of LED-based luminaires. With this in mind, the article considers issues related to the comparison of light output of LED products and conventional lighting fixtures. Separately considered the evaluation criteria and available test methods to determine the service life of LED systems. Separately outlined the problems of evaluation and the factors that hinder the obtaining of reliable results. On the basis of the obtained results, the requirements to be met by the systems and criteria for assessing the efficiency of luminaires based on LEDs are formulated.*

Keywords*: LED, evaluation, efficiency, design, module, criteria, driver, optics, lightingfixtures.*

Аннотация*. На сегодняшний день уверенно можно утверждать тот факт, что светодиод кардинальным образом изменил индустрию освещения и оценивается как наиболее предпочтительный источник света для большинства осветительных приложений. Однако несмотря на свою популярность и широкое промышленное приложение, в настоящее время отсутствует единый стандартизированный подход к оценке эффективности светильников на основе светодиодов. С учетом отмеченного, в статье рассмотрены вопросы, касающиеся сравнения световой отдачи светодиодных изделий и обычных осветительных приборов. Отдельно рассмотрены критерии оценки и доступные методы проведения испытаний, позволяющие определить срок службы светодиодных систем. Также обозначены проблемы проведения анализа и факторы, препятствующие получению достоверных результатов. Систематизируя рассмотренный материал, сформулированы требования, которым должны отвечать системы и критерии оценки эффективности светильников на основе светодиодов.*

Ключевые слова*: светодиод, оценка, эффективность, дизайн, модуль, критерии, драйвер, оптика.*

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

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

В последние годы наблюдается значительный рост использования светильников на основе светодиодов. Светодиодное освещение является одной из самых популярных технологий современной эпохи благодаря своим изменчивым физическим конструкциям, низкому энергопотреблению и очень высокой надежности по сравнению с другими традиционными решениями в области освещения. Соответствующее применение светодиодных источников света может предложить измеримое улучшение функций и производительности, по сравнению с традиционными осветительными приборами, и это вместе с их долговечностью и связанными с этим относительными долгосрочными преимуществами в стоимости [1].

На сегодняшний день, эксперты отмечают, что во всем мире около 1/3-1/2 коммерческих, промышленных и наружных светильников используют светодиодные модули. Потенциальная экономия электроэнергии при использовании светодиодов превышает 50%, что в сочетании с длительным сроком их службы значительно снижает затраты на эксплуатацию и обслуживание [2]. Это делает срок окупаемости светодиодов коротким, а проекты освещения более склонными к выбору этой экологически безопасной технологии. В отчете Международного энергетического агентства за 2024 год, описывающем прогресс на пути к будущему сценарию устойчивого развития, отмечено, что за последние годы глобальное использование светодиодов увеличивается стремительными темпами. С доли рынка в 5% в 2013 году показатель возрос почти до половины мировых продаж осветительных приборов в 2024 году, причем встроенные светодиодные светильники занимают значительную часть рынка светодиодов. Ожидается, что в скором будущем рынок светодиодов поглотит полностью сегмент компактных люминесцентных ламп и люминесцентных ламп с холодным катодом.

При этом прогнозируется, что объем рынка светодиодного освещения вырастет с 79,59 млрд долларов США в 2024 году до 239,6 млрд долларов США к 2035 году, что соответствует среднегодовому темпу роста в 10,53% в прогнозируемый период 2024–2035 годов [3] (см. рис. 1).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

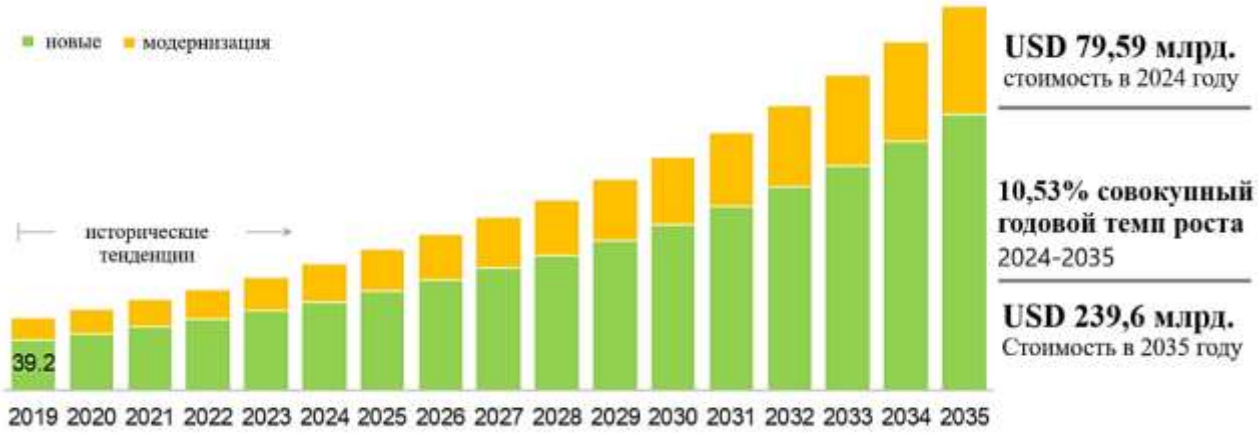


Рис. 1 Мировой рынок светодиодного освещения
по типу установок, млрд. дол. [3]

Статистические данные свидетельствуют о том, что за последние несколько лет развитие рынка светодиодного освещения происходило гораздо быстрее, чем предсказывали исследования. В тоже время, после широкого распространения светодиодов, определение характеристик светильников стало более сложным по сравнению с традиционными источниками света. Понимание и сравнение технических параметров светодиодов ошибочно кажется простым делом: достаточно ознакомиться с техническим паспортом, сравнить показатели светоотдачи, эффективности люменов и на основании этого сделать вывод. Однако, любое решение о покупке или проектировании, основанное только на верхних цифрах - спецификациях на первых страницах - без анализа того, как светодиоды будут работать в реальных условиях эксплуатации, может привести к неудовлетворительным результатам и значительным бизнес-рискам.

Отсутствие универсальных регламентов, стандартов и норм, позволяющих измерять или сравнивать характеристики светодиодных светильников, влечет за собой неопределенность. Ситуация усугубляется тем, что на рынке присутствуют новые и непроверенные компании, некоторые из которых делают сомнительные заявления о производительности своей продукции.

Таким образом, принимая во внимание тот факт, что в сфере оценки производительности не существует единого мнения и согласованных норм, а анализ качества используемых светодиодов и их эффективности как системы имеет важное значение для понимания долгосрочных эксплуатационных характеристик в течение всего срока службы, более детальное изучение данных вопросов представляет собой актуальную и важную научно-практическую задачу, что и предопределило выбор темы

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

данной статьи.

Результаты ряда высоко ускоренных испытаний светодиодных светильников на деградацию при различных уровнях температуры и влажности представлены в публикациях Jun Wang, Tian Wang [4], Masashi Miyakawa, Hiroshi Tsuji [5].

Вопросы, связанные с деградацией светового потока из-за безизлучательной рекомбинации в эпитаксиальных дефектах и изменения электрических параметров вследствие увеличения токов утечки, в результате чего срок службы и производительность светодиодов ограничиваются наличием дефектов в структуре эпитаксиального слоя, описывают в своих публикациях Фролова И.В., Радаева О.А., Сергеевf В.А. [6], Курносов Т.Г., Ашрятов А.А. [7].

В работах Шамшиддинова М.К. [8], Иванова А.М. и Клочкова А.В. [9] рассматриваются критерии отказа светодиодных светильников, такие как снижение светового потока (например, до уровня L70) и изменение цветовых характеристик, включая смещение цветовой температуры и ухудшение индекса цветопередачи, как показатели, ограничивающие срок службы.

Анализ публикаций по теме исследования показывает, что вопросы связанные с оценкой производительности и эффективности светодиодного освещения ученые рассматривают с разных точек зрения, однако ряд проблемных моментов не нашел своего должного освещения в научно-экспертной литературе. Так, в дальнейшем развитии нуждаются методы и подходы моделирования изменения характеристик светодиодных ламп в течение срока службы с учётом нескольких управляющих показателей. Отдельного внимания заслуживает анализ деградации светодиодного светильника, включая светодиодный драйвер в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении подходов к оценке эффективности светильников на основе светодиодов.

Эффективность светодиода можно охарактеризовать различными способами, но в большинстве случаев она устанавливается несколькими факторами, которые на практике становятся кумулятивными в своих положительных или отрицательных аспектах [4]. Сравнение светоотдачи и срока службы наиболее эффективных светодиодных осветительных приборов и традиционных источников света представлено в таблице 1.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 1

Сравнение световой отдачи лучших в своем классе светодиодных изделий и обычных осветительных приборов

Светодиодные продукты		
Тип/марка	Световая отдача (лм/Вт)	Срок службы (L70) (ч)
Светодиодная лампа A19 (с регулировкой яркости, 2700 K)	100	25,000
Светодиодная лампа PAR38 (3000 K)	88	25,000
Светодиодная трубка T8 (4000 K)	149	50,000
Светодиодный светильник 6″ (3000 K)	86	50,000
Светодиодный плафон 2′ Ч 4′ (3500 K)	129	50,000
Светодиодный светильник высокого/низкого уровня (4000 K)	136	60,000
Светодиодный уличный светильник (5000 K)	118	60,000
Традиционные осветительные приборы		
Тип/марка	Световая отдача (лм/Вт)	Срок службы (ч)
Лампы накаливания	15	1,000
Галогенная лампа	20	8,400
Люминесцентная лампа	70	12,000
Люминесцентная лампа с возможностью регулировки яркости	70	12,000
Линейная люминесцентная система	108	25,000
Высокоинтенсивная газоразрядная лампа (многоваттная)	115	15,000
Высокоинтенсивная газоразрядная лампа (маломощная)	104	15,000

Итак, согласно рекомендациям международных организаций по стандартизации и качеству для оценки эффективности светильников на основе светодиодов и определения того, в течение какого периода времени они будут поддерживать свои номинальные характеристики, необходимо оценить как «начальные», так и «временные» параметры [5, 6] (см. рис. 2).

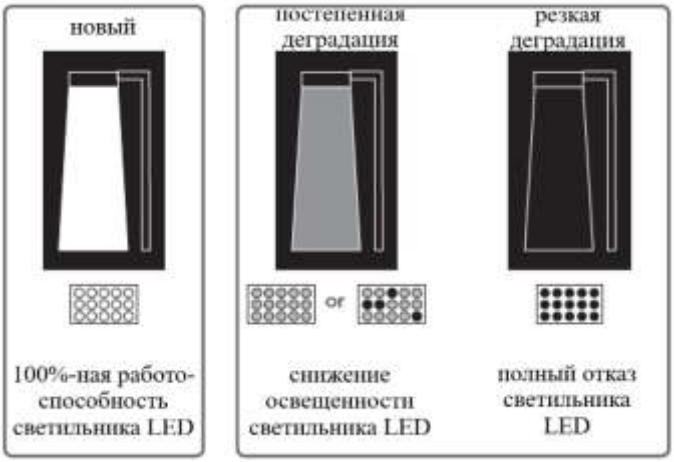


Рис. 2 Оценка «начальных» и «полезных эксплуатационных характеристик» светильников на основе светодиодов

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Постепенная деградация светового потока приводит к снижению освещённости на обслуживаемой поверхности. В данном случае в ходе оценки имеет значение, какая часть первоначального светового потока источников света в светильнике доступна через определенный период времени. Снижение светового потока может быть обусловлено деградацией отдельных светодиодов, излучающих меньше света, а также выходом из строя некоторых светодиодов, полностью прекративших излучение [7].

Резкая деградация светового потока описывает ситуацию, при которой светильник на основе светодиодов полностью прекращает излучение из-за отказа всей системы или её критического компонента.

Оценка долговечности светодиодных светильников осуществляется с использованием стандартных показателей, таких как уровень поддержания светового потока (например, L70, L80) и номинальный срок службы [8].

Одним из основных международных стандартов производительности светодиодных светильников для общего освещения является IEC 62722-2-1 «Luminaire performance – Part 2-1: Particular requirements for LED luminaires». В России действует гармонизированный ГОСТ IEC 62722-2-1-2017 «Светильники. Часть 2-1. Частные требования к характеристикам для светильников со светодиодными модулями» [9]. Предложенный в стандарте метод испытаний предусматривает минимальное время тестирования 6000 часов, при этом световой поток регистрируется каждые 1000 часов.

Основные ключевые характеристики, изложенные в стандарте IEC 62722-2-1, с ориентацией на которые следует определять производительность и эффективность светодиодных светильников, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Критерии эффективности, согласно стандарту IEC 62722-2-1

Термин	Единица	Краткое описание
Потребляемая мощность	W	Потребляемая электрическая мощность, включая работу необходимых компонентов
Восстановленный световой поток	lm	Освещённость, учитывающая спектральную чувствительность человеческого глаза, определяется путем взвешивания мощности излучения на каждой длине волны в соответствии с характеристиками, заданными стандартом «фотометрический наблюдатель CIE»
Номинальная световая эффективность	lm/W	Отношение светового потока светильника к потребляемой электрической мощности
Распределение номинальной силы света	cd или cd· klm^{-1}	Табличные или графические данные, указывающие на пространственное распределение и интенсивность излучаемого света
Номинальные значения координат цветности, как исходные, так и поддерживаемые		Цвет с точки зрения оттенка и насыщенности на двумерной диаграмме цветности CIE

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Термин	Единица	Краткое описание
Номинальный медианный срок службы, L_x (альтернативное обозначение L_xB_y)	час	Время, в течение которого 50% светодиодных модулей не обеспечивают хотя бы процент *x* от начального светового потока
Номинальное значение резкого отказа	%	Процент светильников на основе светодиодов, которые не работают в течение среднего срока службы
Номинальная коррелированная цветовая температура	K	Стандартизованный показатель оттенка света, характеризующий его теплоту или холодность.
Номинальный индекс цветопередачи (CRI)	0-100	Измерение способности воспроизводить цвета по сравнению с идеальным или «естественным» источником света (обычно 80+).
Номинальная температура окружающей среды, связанная с производительностью светильника	°C	Самая высокая температура окружающей среды вокруг светильника, связанная с номинальной производительностью светильника при нормальных условиях эксплуатации

В настоящее время оценка эффективности светодиодной продукции является сложной задачей. Это объясняется двумя основными причинами:

1. Разные производители используют различные технические определения для описания характеристик своих продуктов, что затрудняет их сравнение.
2. Технический дизайн продукта может иметь огромное значение с точки зрения производительности. Даже если два светильника построены на совершенно одинаковых светодиодах, их характеристики могут сильно отличаться из-за выбранного дизайна.

Например, если сравнить эффективность (выраженную в люменах на ватт) на рис. 3, то очевидным является тот факт, что дизайн продукта может иметь большое значение для системной производительности светильника. Эффективность управления тепловыделением, драйвер и оптика способны повлиять на эффективность всего светильника на основе светодиодов.

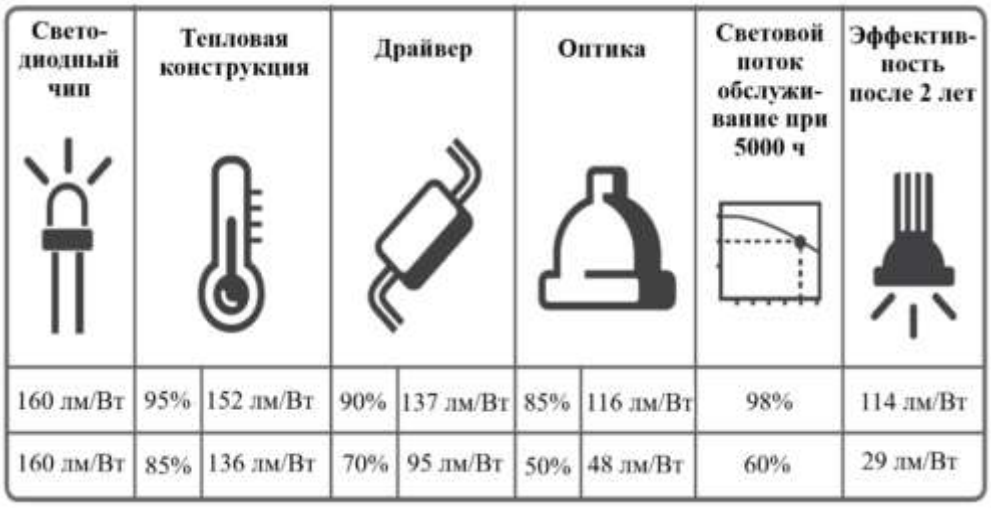


Рис. 3 Влияние выбора дизайна на производительность

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Следует отметить, что помимо критериев в процессе оценки эффективности LED немаловажную роль играет выбор рациональных и действенных методов оценки. В данном контексте внимания заслуживает тот факт, что до 2007 года учеными и экспертами разрабатывались оценки отдельных компонентов светодиодных приборов, таких как корпус, вторичная просвечивающая оптика и драйверы [10]. Примерно с 2008 года исследовательский интерес был расширен до изучения аспектов надежности и срока службы светодиодных систем как единого комплекса для определения режимов отказов на уровне системы, частоты отказов отдельных элементов и наиболее часто встречающихся механизмов отказов. Преимуществом данного подхода является то, что комплексный анализ, предусмотренный в его рамках, позволяет оценивать взаимодействие между отдельными компонентами, которое в противном случае не учитывается, но, тем не менее, имеет решающее значение для определения общей надежности системы.

Модель, представленная в уравнении, отражает влияние деградации оптических материалов на поддержание светового потока для светодиодного устройства:

$$E_{tot}(t) = E_{init}F_{LEDs}[L(t)]^m[R(t)]^n$$

где $E_{tot}(t)$ - общий световой поток от светильника в момент времени *t*;

E_{init} - начальный световой поток от светильника в нулевой момент времени.;

F_{LEDs} -коэффициент поддержания светового потока светодиода в момент времени *t*;

L(t)-изменение нормированного коэффициента пропускания линзы в момент времени *t*;

m- коэффициент, зависящий от конструкции линзы, определенный в результате моделирования;

R(t)-изменение нормированного отражающего коэффициента отражателя в момент времени *t*;

n- коэффициент, зависящий от конструкции отражателя, определенный в результате моделирования.

По мере появления на рынке светодиодной продукции потребность в методах тестирования надежности и срока службы на уровне системы первоначально восполнялась методами, которые производители исторически использовали для других электронных систем, включая:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

- ускоренное ресурсное тестирование;
- высокоскоростное испытание на долговечность;
- испытания на ускоренную деградацию при ступенчатом напряжении.

Систематизируя представленную выше информацию, сформулируем требования, которым должны отвечать системы и критерии оценки эффективности светильников на основе светодиодов.

1. Возможность тестировать изделия как систему, не нарушая целостности оцениваемых образцов, и в условиях, включающих стрессовые факторы, присутствующие в предполагаемом применении, такие как: окружающая среда, (температура, относительная влажность), модель использования.

2. Учитывать различные режима отказа:

- параметрический, основанный на:
  - сохранении яркости;
  - сдвиге цветности;
- катастрофический, учитывающий:
  - полный отказ (например, образцы не дают никакого светового потока или дают резко низкий поток);
  - поведение в конце срока службы (например, прерывистая работа, циклическое включение-выключение, мерцание).

3. Используемые методы и подходы должны быть прогнозируемыми:

- испытания должны включать не менее трех условий, охватывающих диапазон возможных условий применения, чтобы обеспечить интерполяцию, или одно испытание для наихудшего сценария;
- оценка срока службы должна основываться на более коротких прогнозах, сделанных для параметрических и катастрофических режимов отказа.

4. Срок проведения оценки и испытаний должен быть как можно более коротким (т.е. ускоренным). Судя по откликам представителей отрасли, испытания продолжительностью более 6 000 часов нецелесообразны в связи с быстрым циклом развития рынка новых и существующих продуктов.

Резюмируя результаты проведенного исследования, можно отметить, что за последние несколько лет произошли существенные изменения в светотехнической отрасли. На рынке появился широкий спектр светодиодных светильников по доступной цене, что в свою очередь усложнило оценку их эффективности и производительности. Проведенный в статье анализ свидетельствует о том, что для поддержания высококачественного освещения крайне важно, чтобы проектировщики и специалисты

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

по спецификациям имели в своем распоряжении соответствующие стандартизированные и доступные показатели, которые позволили бы обеспечить выбор и правильное применение надежной продукции.

References

1. Курносов Т.Г., Ашрятов А.А. Анализ проблем и ограничений существующих систем освещения // Полупроводниковая светотехника. – 2024. №3-4 (86) С. 6-8.
2. Железникова О.Е., Бленцов И.В., Микаева С.А. Оценка эффективности освещения светодиодами // Автоматизация. Современные технологии. 2024. Т. 78. № 6. С. 251-257.
3. Liang Zhang, Runan Zhang Investigating Driving Current and Environmental Conditionson Micro-LED Performance Metrics // SID Symposium Digest of Technical Papers. 2024. Volume 55, Issue S1. P. 87-93.
4. Jun Wang, Tian Wang Numerical Investigation on the Performance Enhancement of InGaN/GaN Light-Emitting Diodes with a Novel p-i-n Electron-Blocking Layer // International Journal of Optics. 2024. Volume 2024, Issue 1. P. 20-29.
5. Masashi Miyakawa, Hiroshi Tsuji Highly Stretchable LED Display Using Liquid Metal and Molybdenum-Barriered Multilayer Electrodes with Long-Term Reliability // Advanced Electronic Materials. 2024. № 98. P. 187-194.
6. Фролов И.В., Сергеев В.А., Радаев О.А. Диагностический контроль качества светодиодов по динамическим параметрам электролюминесценции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2020. Т. 2. С. 142-144.
7. Курносов Т.Г., Ашрятов А.А. Пути повышения энергоэффективности освещения административных помещений // International journal of Professional Science. 2024. - №6. – С. 21-27.
8. Шамшиддинов М.К. Повышение энергоэффективности энергосберегающего светодиодного освещения // Universum: технические науки. 2021. № 4-4 (85). С. 74-76.
9. ГОСТ IEC 62722-2-1-2017. Светильники. Часть 2-1. Частные требования к характеристикам для светильников со светодиодными модулями. — М.: Стандартинформ, 2017. — 58 с.
10. Фролов И.В., Радаев О.А., Сергеев В.А. Исследование изменений пороговых и граничных параметров электролюминесценции светодиодов при испытаниях под действием тока // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2022. Т. 2. С. 55-57.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 338.054.23

Li Yan, Sukhanov G.G. Cascading risks of industrial infrastructure in the context of arctic permafrost degradation: a case study of the Norilsk accident

Li Yan
Higher School of Natural Sciences and Technologies,
Northern (Arctic) Federal University
Sukhanov Georgiy Genrikhovich,
Higher School of Economics, Management and Law,
Northern (Arctic) Federal University

Abstract. *The 2020 Norilsk diesel spill was one of the worst environmental disasters in the Arctic, exposing the vulnerability of infrastructure caused by permafrost degradation. This paper builds a Climate-Engineering-Management framework to analyze the cascading risks:*

Climate change leads to permafrost degradation (Driving layer), which in turn leads to foundation failure and oil tank collapse (Failure layer); oil spill triggers ecological and social consequences (Diffusion layer), while delayed response exacerbates the disaster (Response layer). This accident is the result of the combined action of permafrost degradation, technical and construction defects, and management negligence.

Keywords: *Permafrost degradation; Cascading risks; Norilsk accident; Arctic infrastructure; Environmental risk management*

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

1. Introduction

The Arctic is warming at a rate of 1.0°C per decade due to ice albedo feedback, exacerbating the pressure on the “Driving layer” of cascade risks (Soyez, 2020: 3) . Norilsk, the northernmost industrial city in the world, is built on permafrost and is highly susceptible to the effects of permafrost degradation caused by climate change.

On May 29, 2020, a diesel storage tank at Norilsk Nickel's thermal power plant No. 3 collapsed, leaking 21,000 tons of diesel. Approximately 15,000 tons of diesel flowed into the Anbarnaya River, and 6,000 tons of diesel seeped into the soil, contaminating an area of 180,000 m^2 (Norilsk Nickel, 2021: 23). This accident was not only a technical malfunction, but a series of chain reactions triggered by climate change, technical and construction defects, and management risk. Permafrost degradation in the Arctic is one of the main reasons for this accident.

Existing research has examined the reasons for the accident, including permafrost degradation, building defects, and management failures (Ryzvanov et al., 2022: 344), as well as its consequences: contaminant diffusion (Bezmatemykh et al., 2021: 414), soil deposition (Androkhanov et al., 2021: 69), and groundwater contamination (Yakuteni and Solovyev, 2020:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

52).

Schneider von Deimling et al. (2021:2451) revealed the “two-stage behavior” of permafrost degradation, explaining how the pressure from the “Driving layer” nonlinearly transformed into the risk of the “Failure layer”. However, these findings remain fragmented.

This paper, referencing the research of Ma Xiaoxue et al. (2022: 222), introduces the concept of cascading risk and integrates all risk factors into a unified cascading risk framework (Driving layer-Failure layer-Diffusion layer-Response layer) to reveal the complete risk propagation path of infrastructure on permafrost in the Arctic.

2. Correlation between permafrost degradation and infrastructure risk

2.1 Engineering mechanisms of permafrost-infrastructure interaction

Industrial facilities transfer heat downwards, accelerating the warming of permafrost in the Arctic. The industrial region in Norilsk has experienced accelerated warming in recent decades (Soyez, 2020: 3) . The continuous warming is the core driver of the “Driving layer”.

In the case of permafrost degradation, the bearing capacity of pile foundations in industrial infrastructures decreases, and permafrost creep rate and uneven settlement of pile foundations accelerate (Schneider von Deimling et al., 2021: 2455). These effects exhibit significant time lags: risks accumulate slowly until a critical point is reached, and then manifest in the form of structural failure. This is the key engineering mechanism of cascading risks.

2.2 Analytical framework for cascading risks

This paper constructs a four-stage model of infrastructure risk cascades in the permafrost region of the Arctic. This framework places the accident within a coupled "Climate-Technology-Management" system, emphasizing the risk transmission paths across four interrelated levels:

Driving layer: It is the systemic pressure source. Continuous climate warming leads to permafrost degradation.

Failure layer: It is the critical disturbance. Structural failures are caused by permafrost degradation and construction defects.

Diffusion layer: It amplifies the consequences. Pollutants diffuse through soil, surface water, and groundwater.

Response layer: It belongs to external intervention. The effectiveness of emergency response and governance determines the final extent of damage.

3. Cascading risk analysis of the Norilsk accident

3.1 Accident overview and direct causes of the "Failure Layer"

On May 29, 2020, a diesel storage tank at Norilsk Nickel's thermal power plant No. 3 collapsed, leaking 21,000 tons of diesel. This is the start point of the “Failure layer”.

According to the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Russia (Rostekhnadzor), the accident was caused by three interacting factors (Ryzvanov et al., 2022: 344):

(1) Technical factors: Pile displacement and uneven settlement are caused by permafrost degradation.

(2) Construction defects: The piles were shorter than designed and not embedded in bedrock, increasing the risk of loss of pile bearing capacity.

(3) Management failures: The tank had been in need of major repair since 2018, but was put into use without safety assessment. These failures create safety hazards for the “Response layer”.

3.2 Transition from the “Driving Layer” to the “Failure Layer”

Prior to the accident, the warming rate in the Arctic reached a rate of 1.0°C per decade (Soyez, 2020: 3), leading to permafrost degradation. As permafrost degraded, permafrost began to creep, and the bearing capacity of the pile foundations decreased, resulting in the settlement of pile foundations.

The process is difficult to detect because of the slow temperature changes and lack of monitoring. The uneven settlement of pile foundations leads to cracks in the bottom and wall of the storage tank, ultimately resulting in diesel spill. The accident was consistent with the predictions of the “Two-stage” model (Schneider von Deimling et al., 2021: 2455), and was the result of long-term interaction between permafrost degradation and construction defects.

3.3 Systemic collapse from the "Failure Layer" to the "Diffusion Layer"

(1) Dam collapse

The capacity of the dam was too small to bear the dynamic impact of diesel spill, leading to the collapse of the storage tank (Norilsk Nickel, 2021: 23). This marks that the accident transferred from the “Failure layer” to the “Diffusion layer”. An accident that could have been controlled began to spread outside.

(2) Diffusion path

6,000 tons of pollutants seeped into the soil, and 15,000 tons of pollutants entered the Anbarnaya River. Analysis confirmed that dissolved diesel migrated towards the Kara Sea (Bezmatemykh et al., 2021: 414). At the same time, pollutants also seeped into the ground: in addition to 880 tons of contaminated soil removed, estimated 5,120 tons of pollutants entered the groundwater system, forming a long-term pollution source (Yakuteni & Solovyev, 2020: 52).

Crucially, the “Diffusion layer” did not stop with the water. Soil surveys indicate that large-scale pollutant deposition was found at 25-30 km downstream of the Anbarnaya River; the total petroleum hydrocarbon (TPH) concentration in this area was as high as 133-373 mg/cm³, while only 10-12 mg/cm³ upstream (Androkhanov et al., 2021: 69). Therefore, most of the diesel spill did not flow into Lake Piasino, but rather accumulated in the abrupt slope area due to the

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

unique downstream topography (Androkhanov et al., 2021: 69), thus altering the ultimate scope of impact.

3.4 "Response Layer" failure and disaster amplification

As the risk spread, the “Response layer” completely failed, exacerbating the disaster.

The risk assessment from the company estimated the probability of a catastrophic accident at 1.5×10^{-5}, but ignored the dynamic risks (Schneider von Deimling et al., 2021: 2455). At the same time, the emergency response plans were inadequate, as evidenced by the failure of the oil boom, and the concentration of pollutants outside the boom exceeded the safety standard by several times (Yakuteni & Solovyev, 2020: 52). More seriously, the company delayed reporting the spill (Shushakova, 2020: 456), causing the “Diffusion layer” to spread uncontrollably.

4. Discussion on the reasons of cascading risks

4.1 Coupling characteristics of multi-source risks

The risk coupling characteristics of the Norilsk accident (shown in the table below) clearly reveal why individually controllable risks, when combined, lead to disaster.

Risk type	Specific manifestations	Role in the cascade	Coupling mode
Technical risk	1. Insufficient pile length 2. Failure to embed in bedrock	Direct reasons for failure	Long-term latency
Geological risk	1. Permafrost degradation 2. Decrease in bearing capacity	Systemic pressure source	Driven by climate change
Management risk	1. Lack of monitoring 2. Assessment errors 3. Delayed response	Amplification of failure consequences	Superimposed amplification

In fact, each individual risk could have been effectively controlled from the “Driving layer”, “Failure layer”, and “Response layer”.

Proper construction of pile foundations could have prevented rapid failure; continuous permafrost monitoring could have helped to detect the pile settlement early; adequate emergency plans could have effectively controlled pollution. However, technical, geological, and managerial risks accumulate over time, ultimately converging into a systemic disaster at the "Diffusion layer".

4.2 Uniqueness of infrastructure risks in permafrost regions

First, permafrost is dynamic. The mechanical properties of permafrost will change with the temperature, thus requiring continuous monitoring.

Second, climate change is dynamic. Historical data cannot predict future changes; failure times may be underestimated if the models ignore thermal disturbances (Schneider von Deimling et al., 2021: 2455). This is precisely why the assessment of the probability of a catastrophic event (1.5×10^{-5}) failed.

Third, a positive feedback loop exists. Heating infrastructure accelerates permafrost

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

degradation, creating a vicious cycle. Post-accident monitoring systems aim to break this cycle (Nornickel, 2021: 23).

5. Conclusions and implications

5.1 Main conclusions

First, this accident was the result of the superposition of multiple risks related to climate change, engineering, and management: permafrost degradation created systemic pressure (Driving layer); construction defects laid safety hazards (Failure layer); and management errors exacerbated the consequences of the risks (Diffusion layer). This illustrates the cascading development process of risks from slow accumulation to sudden outbreak.

Second, traditional risk assessment methods will be ineffective under the nonlinear and insidious nature of permafrost degradation. The company considered that catastrophic failure is impossible based on the probability of 1.5×10^{-5}, while ignoring the situation of permafrost degradation. Assessment methods based on static probability fail in non-stationary environments (Schneider von Deimling et al., 2021: 2455).

Third, cascading risk management requires systemic synergy among technologies, management, and institutions. It is insufficient to improve a single stage; instead, we should apply systematic measures, such as engineering remediation, permafrost monitoring, early warning, and standard revision.

5.2 Implications for risk governance

Based on the lessons learned from the Norilsk accident, the following recommendations are made:

(1) Technical aspects

It is necessary to promote thermal stabilization technologies and build a comprehensive monitoring system for permafrost in the Arctic. The monitoring systems built by the company after the accident strengthened monitoring of the “Driving layer” and provided early warning of risks to the “Failure layer” (Nornickel, 2021: 23). This accident highlighted the necessity of complying with environmental regulations and regular equipment monitoring.

(2) Management level

Risk assessment must be elevated from static compliance to dynamic analysis, incorporating climate change scenarios and cascading pathways. The risk assessment process must cover the entire chain from the “Driving layer” to the “Response layer”.

(3) Institutional aspects

Incorporate climate change factors into engineering design standards for permafrost in the Arctic. Regularly update relevant standards to ensure they accurately reflect the current situation. Establish a special fund for environmental protection and remediation, ensuring the availability of funds. Revise and improve risk emergency response plans to ensure they comply with dynamic principles.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Гидрохимические показатели качества воды Норило-Пясинской озерно-речной системы после разлива дизельного топлива на ТЭЦ-3 г. Норильска в 2020 г / Д. М. Безматерных, А. В. Пузанов, А. В. Котовщиков [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2021. – Т. 28, № 4. – С. 408-422.

2. Меры по предотвращению кризисных ситуаций техногенного характера на примере аварии на ТЭЦ в Норильске 20 мая 2020 года / Р. А. Рызванов, Д. А. Шапран, Н. В. Кондрашов, В. А. Сосновцев // Экология и безопасность жизнедеятельности : Сборник статей XXII Международной научно-практической конференции, Пенза, 13–14 декабря 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 342-349.

3. Исследование распространения загрязнения почвенного покрова в результате аварийного разлива дизельного топлива на Норильской ТЭЦ / В. А. Андроханов, Д. А. Соколов, И. Д. Махатков, Ю. В. Ермолов // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2021 : сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 20–23 сентября 2021 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2021. – С. 68-72.

4. Шушакова, К. А. Уроки норильской катастрофы: недопущение и предотвращение / К. А. Шушакова // Трансформация ПРАВА В информационном обществе : Материалы III Всероссийского научно-практического форума молодых учёных и студентов, Екатеринбург, 26 ноября 2020 года. – Екатеринбург: Уральский государственный юридический университет, 2020. – С. 454-460.

5. Якуцени, С. П. Расчёт ущерба окружающей среде в результате аварии на складе ГСМ в Норильске / С. П. Якуцени, И. А. Соловьев // Географическая среда и живые системы. – 2020. – № 4. – С. 48-56.

6. Nornickel. (2021). White paper on the cleanup of the accident at CHPP-3 of JSC NTEC and measures taken by the company. https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/white-paper-2020.pdf

7. Schneider von Deimling, T. et al. (2021). Consequences of permafrost degradation for Arctic infrastructure – bridging the model gap between regional and engineering scales. The Cryosphere, 15, pp. 2451-2471.

8. Soyez, K. M. Evaluation of climate change induced risks in SMMES / K. M. Soyez // Развитие рынков «зеленого» финансирования в России и мире : Сборник статей I Международной научно-практической конференции, Уфа, 24 декабря 2020 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2020. – P. 3-7.

9. 马晓雪, 何佩龙, 乔卫亮 & 刘阳. (2022). 韧性视域下北极航行风险级联效应分析. 极地研究, 34(2), 219-238.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 621.311.1:004.9

Makaev R.R., Plisko A.L. Evaluation of the effectiveness of digitalization of distribution electrical networks

Оценка эффективности цифровизации распределительных электрических сетей

Makaev Rinat Radikovich,
student, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk
Plisko Alexander Leonidovich,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Supply,
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk
Макаев Ринат Радикович,
магистрант, Ульяновский государственный технический университете, г. Ульяновск
Плиско Александр Леонидович,
кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжение, Ульяновский государственный технический университете, г. Ульяновск

Abstract. *This paper presents a multifaceted study of the performance outcomes of digital modernization processes in the distribution power grid complex at voltage classes of 0.4–110 kV. Priority areas of technological renewal of energy infrastructure are analyzed in detail, including the deployment of intelligent measurement complexes, next-generation dispatching control platforms (SCADA/ADMS), fully automated substations built on the IEC 61850 protocol, and self-healing mechanisms for emergency modes (FLISR). Power supply quality indicators (SAIDI, SAIFI) have been systematized, the dynamics of technological and commercial losses have been studied, and economic benefits from practical implementation of digital projects within PJSC Rosseti group have been determined. An original classification of digital transition performance criteria has been developed, covering financial-economic, production-operational, and environmental parameters. The obtained results convincingly demonstrate a significant resource for reducing energy losses (approximately 40–60%), decreasing the duration of emergency modes, and qualitatively improving services for end consumers in the transition to an intelligent energy system.*

Keywords: *digitalization, distribution electrical networks, Smart Grid, intelligent metering systems, SCADA, SAIDI, SAIFI, energy efficiency.*

Аннотация*. Настоящая работа посвящена многоаспектному исследованию результативности процессов цифровой модернизации в распределительном электросетевом комплексе классов напряжения 0,4–110 кВ. Детально проанализированы приоритетные направления технологического обновления энергетической инфраструктуры, среди которых – развёртывание интеллектуальных измерительных комплексов, платформ диспетчерского управления нового поколения (SCADA/ADMS), полностью автоматизированных подстанций, построенных на базе протокола IEC 61850, и механизмов самовосстановления при аварийных режимах (FLISR). Выполнена систематизация индикаторов качества электроснабжения (SAIDI, SAIFI), исследована динамика технологических и коммерческих потерь, а также определены экономические выгоды от практической реализации цифровых проектов в периметре группы компаний ПАО «Россети». Сформирована авторская классификация критериев результативности цифрового перехода, охватывающая финансово-экономические, производственно-эксплуатационные и природоохранные параметры. Полученные результаты убедительно демонстрируют существенный ресурс для сокращения энергопотерь (порядка 40–60%), уменьшения продолжительности аварийных режимов и качественного улучшения сервиса для конечных потребителей при переходе к интеллектуальной энергосистеме.*

Ключевые слова: *цифровизация, распределительные электрические сети, Smart Grid, интеллектуальные системы учёта, SCADA, SAIDI, SAIFI, энергоэффективность.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

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

Введение

Переход к цифровым методам управления энергетической инфраструктурой занимает одно из центральных мест в стратегических документах, определяющих вектор модернизации электроэнергетического комплекса Российской Федерации. Распределительные сети классов напряжения от 0,4 до 110 кВ обслуживают свыше 80% конечных абонентов и одновременно демонстрируют наиболее значительные объёмы технологических потерь, которые в отдельных регионах достигают отметки 12–17% от суммарного количества переданной электрической энергии [1]. По состоянию на начало 2025 года усреднённый показатель физического и морального износа оборудования распределительного звена оценивался экспертами на уровне 60–70%, что неизбежно влечёт за собой повышенную частоту аварийных инцидентов и продолжительные перебои в энергообеспечении потребителей [2].

Парадигма интеллектуальной энергосистемы (Smart Grid) предусматривает всестороннее задействование информационно-коммуникационных решений с целью повышения прозрачности, контролируемости и продуктивности работы электросетевого хозяйства. Согласно Стратегии цифровой трансформации ПАО «Россети» на период 2021–2030 годов, портфель включает 255 инициатив, сгруппированных по 12 стратегическим направлениям: от формирования цифровых районов электросетей до масштабного развёртывания измерительных комплексов нового поколения и модернизации систем оперативно-диспетчерского управления [3]. Тем не менее проблема всесторонней оценки реальной отдачи от проводимых мероприятий в отечественном научном дискурсе разработана фрагментарно, что и обусловливает своевременность и востребованность данного исследования.

Ключевая задача настоящей работы состоит в формировании целостной системы индикаторов и методического инструментария для количественной и качественной оценки результативности цифрового перевооружения распределительного электросетевого комплекса с опорой на обобщение российских и международных практик применения технологий интеллектуальных сетей.

1. Технологическая база цифрового обновления распределительного электросетевого комплекса

Архитектура современной цифровой распределительной сети выстраивается на фундаменте нескольких взаимодополняющих технологических платформ, совокупность которых образует единое информационно-управляющее пространство

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

энергосистемы. Ниже охарактеризованы ведущие технологические направления, определяющие содержание цифровой модернизации распределительных сетей.

Автоматизированные измерительные комплексы (АИК) объединяют в себе интеллектуальные приборы учёта, каналы передачи данных и специализированное программное обеспечение, реализующие функции непрерывного мониторинга параметров электропотребления без участия оператора. Согласно отраслевой статистике, к завершению 2024 года на территории Российской Федерации было смонтировано порядка 13 млн приборов с интеллектуальными функциями, причём более половины из них — свыше 7 млн единиц — приходилось на зону ответственности группы «Россети» [4]. Практическое применение АИК существенно повышает достоверность измерений, даёт возможность фиксировать несанкционированные подключения и формировать рекомендации по рациональному режиму энергопотребления.

Полностью автоматизированные подстанции, проектируемые в соответствии с требованиями международного стандарта IEC 61850, воплощают принципиально иной уровень автоматизации первичного и вторичного подстанционного оборудования. Пионерным объектом этого класса стала подстанция «Тобол» напряжением 500 кВ, введённая в строй в 2018 году, а в мае 2025 года Республика Башкортостан приняла в эксплуатацию первый полностью безлюдный энергообъект — подстанцию «Мирная» класса 110 кВ, эксплуатация которой позволила сократить текущие расходы на содержание объекта более чем на 40% [4].

Программно-аппаратные комплексы диспетчерского управления (SCADA/ADMS) реализуют задачи непрерывного наблюдения за параметрами режима, дистанционного управления коммутационной аппаратурой и оптимизации топологии распределительной сети. Узловыми элементами этой инфраструктуры выступают центры управления сетями (ЦУС), концентрирующие функциональность SCADA, подсистем управления распределением (DMS) и подсистем управления инцидентами (OMS). По состоянию на конец 2023 года в контуре «Россетей» действовали 14 таких центров и 7 городских диспетчерских пунктов [3].

Механизмы автоматического секционирования и самовосстановления (FLISR) позволяют сети самостоятельно выявлять место повреждения, отсекать аварийный участок и перенаправлять потоки мощности по резервным каналам без вмешательства диспетчера. Оснащение линий реклоузерами и телеуправляемыми разъединителями даёт возможность сократить продолжительность обесточивания потребителей с нескольких часов до считанных минут, что кардинально меняет картину показателей надёжности энергоснабжения [5].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Методы машинного интеллекта и беспилотная авиация всё активнее интегрируются в процессы технической диагностики и планового обслуживания сетевой инфраструктуры. Нейросетевая обработка аэрофотоснимков, получаемых с борта БПЛА, позволяет обследовать 1000 км трасс воздушных линий всего за 1,5 суток — вместо 63 суток при классическом пешем осмотре, параллельно сокращая удельную стоимость обследования примерно в 8 раз [4]. Предиктивные модели, обучаемые на массивах исторических данных, обеспечивают заблаговременное прогнозирование вероятных отказов оборудования и позволяют выстраивать ремонтные циклы на основе фактического технического состояния, а не календарных нормативов.

Таблица 1

Ключевые направления цифровой модернизации распределительных сетей

Технологическое направление	Функциональное назначение	Прогнозируемый результат
Автоматизированные измерительные комплексы (АИК)	Непрерывный сбор и трансляция данных об энергопотреблении	Сокращение коммерческих потерь на 30–50%
Автоматизированные подстанции (IEC 61850)	Безлюдное управление подстанционным оборудованием	Уменьшение эксплуатационных расходов до 40%
Платформы SCADA/ADMS	Оперативное управление топологией сети	Рост наблюдаемости до 95–100%
Системы FLISR	Автосекционирование и самовосстановление	Уменьшение длительности перебоев в 5–10 раз
Машинный интеллект и БПЛА	Техническая диагностика ЛЭП и оборудования	Ускорение осмотров в 40 раз, экономия затрат в 8 раз
Датчиковая инфраструктура IoT	Непрерывный контроль состояния активов	Переход к сервису по фактическому состоянию

Источник: составлено автором по материалам [3, 4, 5]

2. Многокритериальная система индикаторов результативности цифрового перехода

В целях объективной и всесторонней оценки отдачи от цифровой модернизации распределительного звена электросетевого хозяйства авторами предложена трёхуровневая система индикаторов, сгруппированных по принципу охвата различных аспектов функционирования энергосистемы: финансово-экономического, производственно-эксплуатационного и экологического.

Блок финансово-экономических индикаторов охватывает: долю технологических потерь в общем объёме переданной электроэнергии; величину коммерческих (небалансных) потерь; чистую приведённую стоимость (NPV) инвестиционных проектов цифрового обновления; период возврата капитальных затрат; удельные вложения в расчёте на единицу снижения потерь. Статистический анализ свидетельствует о том, что усреднённый уровень потерь в отечественных распределительных сетях составляет

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

порядка 10%, тогда как последовательное внедрение интеллектуальных решений способно приблизить этот показатель к оптимальному диапазону 3–5% [4]. Показательным примером служит пилотная площадка в Уфе, где реализация комплекса мер привела к двукратному сокращению потерь — с 16–17% до 8% [4].

Производственно-эксплуатационные индикаторы характеризуют воздействие цифровых преобразований на бесперебойность и качественные параметры электроснабжения. Центральное место среди них занимают общепризнанные на международном уровне метрики SAIDI (средневзвешенная продолжительность отключений в пересчёте на одного потребителя за период) и SAIFI (средневзвешенная частота отключений). В границах цифровых районов электросетей группы «Россети» фиксируется снижение SAIDI в 2–5 раз относительно аналогичных, но не прошедших модернизацию, участков, а значение SAIFI улучшается в 1,5–3 раза [3, 6]. Помимо названных метрик, в блок включены: коэффициент наблюдаемости сетевых объектов; степень автоматизации коммутационных операций; среднестатистическая продолжительность восстановления нормального режима после инцидента.

Экологический блок индикаторов фиксирует вклад цифровых преобразований в минимизацию негативного антропогенного воздействия. Каждый процент снижения сетевых потерь прямо транслируется в уменьшение объёмов генерации и, соответственно, в сокращение эмиссии парниковых газов. Опыт пилотного проекта в столице Башкортостана показал, что комплексное внедрение решений Smart Grid обеспечило ежегодное предотвращение выбросов углекислого газа в размере около 550 тыс. тонн [4].

Рисунок 1 – Сопоставительный анализ параметров работы распределительных сетей до и после цифровой модернизации

Источник: составлено авторами по материалам [3, 4, 6]

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3. Практические итоги реализации цифровых проектов в распределительном электросетевом комплексе России

Накопленный опыт практического воплощения проектов цифровой модернизации распределительных электросетей в Российской Федерации позволяет констатировать весомые практические достижения. Данные корпоративной отчётности ПАО «Россети» указывают на то, что к исходу 2024 года в рамках единой программы было доведено до стадии промышленной эксплуатации 27 масштабных информационно-технологических инициатив. В их числе — обновлённый единый портал электросетевых услуг, корпоративная геоинформационная платформа, мобильная система «Цифровой сотрудник», предназначенная для координации деятельности выездных бригад, и нейросетевые ассистенты, обрабатывающие клиентские обращения в автоматическом режиме [3].

Финансовая динамика убедительно подтверждает нарастание инвестиционной активности в данном направлении. Бюджет «Россети Ленэнерго» на цифровую модернизацию по итогам 2024 года составил 3,68 млрд рублей, продемонстрировав прирост на 56,1% в годовом сопоставлении. Ещё более выраженную динамику показало подразделение «Россети Московский регион», нарастившее аналогичные расходы на 113,5% в 2023 году — до отметки 2,1 млрд рублей [3]. Подобная траектория инвестирования свидетельствует о том, что руководство крупнейших электросетевых организаций признаёт экономическую обоснованность затрат на технологическое перевооружение.

Таблица 2

Основные результаты цифровой модернизации распределительных сетей (по данным проектов ПАО «Россети»)

Контролируемый параметр	Исходное значение	Достигнутое значение
Энергопотери (пилотная зона г. Уфа)	16–17%	8%
Продолжительность осмотра ЛЭП (1000 км)	63 суток	1,5 суток
Удельная стоимость осмотра трасс ЛЭП	Базовый уровень	Уменьшение в 8 раз
Эксплуатационные расходы (ПС «Мирная»)	Базовый уровень	Сокращение >40%
Парк интеллектуальных приборов учёта (Россети)	—	Свыше 7 млн единиц
Степень наблюдаемости распредсетей (Россети)	10–15%	~30% (по данным 2023 г.)
Количество центров управления сетями	—	14 ЦУС + 7 городских ДП

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Отдельного рассмотрения заслуживает практика задействования алгоритмов машинного интеллекта в борьбе с потерями электрической энергии. Инженерный коллектив АО «Екатеринбургская электросетевая компания» выполнил развёрнутое исследование возможностей нейросетевых моделей и методов обучения с учителем для минимизации как технологической, так и коммерческой составляющей потерь [7]. Аналитические платформы с функцией предиктивного моделирования способны заблаговременно идентифицировать зоны аномально высоких потерь и целенаправленно формировать план корректирующих воздействий. Подразделение «Россети Московский регион» применяет связку интеллектуальных измерительных приборов, геоинформационных сервисов и инструментов углублённой аналитики больших данных для обнаружения зон нехарактерного энергопотребления [7].

Существенный вклад в рост общей эффективности вносит программа развёртывания цифровой радиосвязи. На территории «Россети Центр» к завершению 2023 года цифровой радиосвязью была обеспечена приблизительно половина зоны обслуживания, а подразделения в Белгородской, Воронежской, Костромской, Калужской и Владимирской областях вышли на стопроцентный показатель радиопокрытия [3]. Устойчивый канал связи является обязательным условием для полноценного функционирования систем телемеханики, оперативного управления и распределённой автоматики.

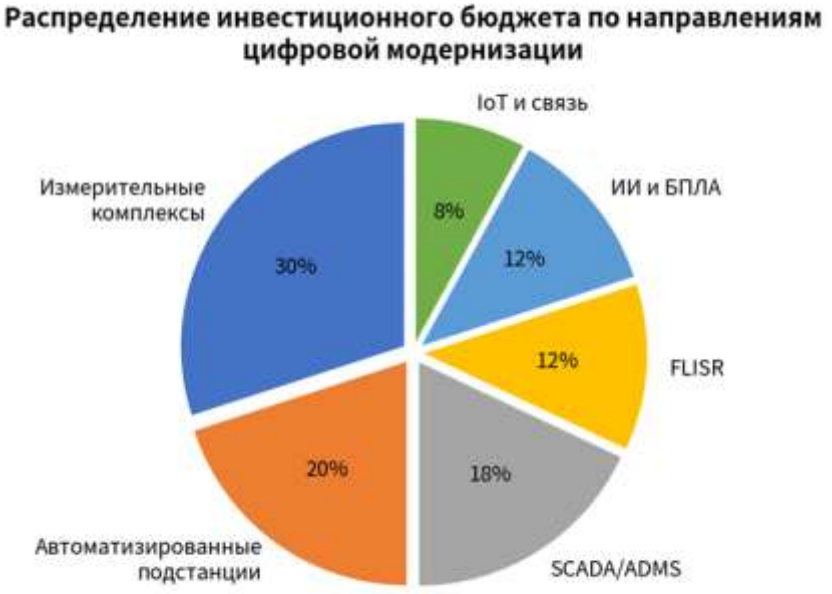


Рисунок 2 – Распределение инвестиционного бюджета по направлениям цифровой модернизации распределительных сетей (оценка авторов)

Источник: составлено автором по материалам [3, 6, 8]

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

4. Дискуссия: достигнутые рубежи и горизонты дальнейшего развития

Выполненное исследование позволяет заключить, что цифровая модернизация распределительного электросетевого комплекса обладает выраженным потенциалом повышения операционной и экономической эффективности. Одновременно необходимо принять во внимание совокупность факторов, способных замедлить темпы трансформации или ограничить масштабы получаемых эффектов.

Прежде всего, значительная капиталоёмкость проектов порождает финансовые ограничения, особенно в условиях государственного регулирования тарифов на передачу электроэнергии. Экспертные оценки фиксируют период возврата вложений в комплексные проекты Smart Grid в диапазоне 5–12 лет, что формирует зону повышенных финансовых рисков для сетевых компаний [8]. Далее, задача обеспечения технологического суверенитета в сфере программных и аппаратных средств автоматизации сохраняет свою остроту: несмотря на то, что в «Россети Центр» доля зарубежного софта в закупках снижена до 10%, а удельный вес отечественной радиоэлектроники достиг 86% [3], достижение полной независимости от импортных поставок пока остаётся перспективной, а не свершившейся задачей.

Наконец, обеспечение киберустойчивости цифровой энергетической инфраструктуры приобретает характер критического вызова. На протяжении 2024 года специализированные подразделения ПАО «Россети» нейтрализовали 96 млн попыток компьютерных атак — рост в 2,4 раза по сравнению с предшествующим годом (40 млн инцидентов) [3]. Стремительная эскалация числа кибератак требует неуклонного наращивания компетенций и инструментария по защите объектов критической информационной инфраструктуры.

К наиболее перспективным направлениям дальнейшей цифровой эволюции распределительных сетей следует отнести: масштабирование применения алгоритмов машинного интеллекта для превентивной диагностики оборудования и адаптивной оптимизации режимных параметров; гармоничное встраивание распределённых энергоресурсов (включая объекты возобновляемой энергетики и накопители) в единый контур управления; создание цифровых двойников сетевых объектов для имитационного моделирования и оптимизации эксплуатационных сценариев; развитие механизмов управления спросом (demand response), направленных на повышение гибкости и адаптивности энергосистемы к стохастическим изменениям нагрузки [5, 8].

Заключение

По итогам выполненного исследования сформирована и обоснована трёхуровневая система индикаторов для оценки результативности цифровой

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

модернизации распределительного электросетевого комплекса. Указанная система охватывает финансово-экономические параметры (динамика потерь, чистый дисконтированный доход, срок возврата инвестиций), производственно-эксплуатационные метрики (SAIDI, SAIFI, степень наблюдаемости, оперативность восстановления) и экологические характеристики (объём предотвращённых выбросов CO_2).

Обобщение отечественного опыта позволяет зафиксировать следующие практически подтверждённые результаты применения технологий интеллектуальных сетей: сокращение технологических потерь электроэнергии на 40–60% (с исходных 12–17% до целевых 5–8%); уменьшение длительности аварийных режимов в 2–5 раз; снижение эксплуатационных затрат на содержание энергообъектов до 40%; многократное ускорение процедур диагностического обследования линейной инфраструктуры. Масштабное развёртывание интеллектуальных приборов учёта (свыше 13 млн единиц на территории России) формирует информационную основу для перехода к проактивной модели управления сетевыми активами.

Последовательное углубление цифровой модернизации распределительного звена энергосистемы предполагает комплексный подход, сочетающий технологические инновации, организационные преобразования, актуализацию нормативно-правового регулирования и укрепление киберзащищённости критически значимой инфраструктуры.

Полученные в ходе исследования результаты могут быть востребованы электросетевыми организациями при формировании инвестиционных программ технологического перевооружения и технико-экономическом обосновании капитальных затрат на модернизацию распределительных сетей.

References

1. Лоскутов А.Б., Куликов А.Л., Илюшин П.В. От плана ГОЭЛРО к цифровизации электроэнергетического комплекса страны // Электричество. 2020. № 7. С. 4–14.

2. Ховалова Т.В., Жолнерчик С.С. Эффекты внедрения интеллектуальных электроэнергетических сетей // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 4. С. 78–89.

3. Цифровизация в Россетях // TAdviser. 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровизация_в_Россетях (дата обращения: 15.03.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

4. Технология Smart Grid: суть и внедрение в России // Рынок Электротехники. 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://marketelectro.ru/tekhnologiya-smart-grid-sut-i-vnedrenie-v-rossii-v-2025-godu (дата обращения: 15.03.2026).

5. Применение искусственного интеллекта для снижения потерь электроэнергии // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. 2026. Специальный выпуск «Россети». № 1 (40).

6. Совещание «Повышение энергетической эффективности распределительных электрических сетей» в Совете Федерации. 10 марта 2025 г. [Электронный ресурс]. URL: https://kodeks.ru (дата обращения: 15.03.2026).

7. Применение инструментов VBA при проведении работ по снижению потерь // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. 2026. Специальный выпуск «Россети». № 1 (40).

8. Международный опыт цифровой трансформации электроэнергетики / Roland Berger. 2020. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rolandberger.com (дата обращения: 15.03.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 621.86.621.893

Toigambaev S.K., Abdulmazhidov Kh.A. Thermal hardening as a way to increase the resource of ploughshares

Термоупрочнение как способ увеличения ресурса плужных лемехов

Toigambaev S.K.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Timiryazev Russian State Agrarian University, Moscow, Russia.
Abdulmazhidov Khamzat Arslanbekovich,
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Organization and Technologies of Hydraulic Reclamation and Construction Works.
Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia.
Тойгамбаев С.К.
д.т.н., профессор кафедры тракторы и автомобили Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.
Абдулмажидов Хамзат Арсланбекович
д.т.н., доцент кафедры организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ. Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.

Abstract. *The high intensity of wear of individual parts of solid metal ploughshares operated on light soils (sandy loam) with high wear capacity significantly limits their resource due to the outstripping appearance of xiphoid wear of the toe and wear of the deepening part, while the total area of sandy loam in the non-Chernozem region reaches 30%, and the repeatability coefficients of wear are 0.84 and 0.53, respectively. The known technological processes for eliminating the noted wear are not effective enough. This article presents one of the methods of thermal hardening as a way to increase the resource of plowshares.*

Keywords: *thermal hardening; wear; technological process; temperature; hardness; resource; part.*

Аннотация. *Высокая интенсивность изнашивания отдельных частей цельнометаллических лемехов, эксплуатируемых на легких почвах (супеси) с высокой изнашивающей способностью существенно ограничивает их ресурс по причине опережающего появления лучевидного износа носка и износа заглубляющей части, этом суммарная площадь супесей в нечерноземье достигает 30%, а коэффициенты повторяемости износов - 0,84 и 0,53 соответственно. Известные технологические процессы устранения отмеченных износов, недостаточно эффективны. В данной статье приведен один из методов термоупрочнения как способа увеличения ресурса плужных лемехов.*

Ключевые слова: *термоупрочнение; износ; технологический процесс; температура; твердость; ресурс; деталь.*

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

Среди большого количества способов повышения ресурса деталей, без использования покрытий, особое место занимает упрочняющая термическая обработка [1,2]. Такая обработка основана на структурных изменениях, связанных с нагревом металлического тела выше температур фазовых превращений и последующим

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

охлаждением со скоростью выше критической - она получила название закалка. Её результатом является улучшение ряда механических свойств, в том числе и повышение твердости (Н) [7,8,9,10,11,13]. В свою очередь рост Н способствует увеличению ресурса деталей, особенно эксплуатирующихся в абразивной массе, из-за снижения интенсивности их изнашивания [3,4,7,8]. Термоупрочнение (ТУ), исходя из многочисленной информации, имеет достаточно большое количество разновидностей, которые классифицируются по различным признакам. Деление методов ТУ следует основывать, базируясь на условиях эксплуатации детали и прежде всего вероятности её катастрофического разрушения, как правило, от динамических нагружений. Поэтому классификация должна заключаться в воздействии тепловой энергии на поверхность или на всю глубину обрабатываемого изделия или его части. Тогда термоупрочнение можно рассматривать как поверхностное и объёмное (полное) на всю глубину [5,6,7]. В связи с этим необходимо провести исследования, направленные на разработку технологии восстановления лемехов, обеспечивающей повышенный послеремонтный ресурс и возможность неоднократной реставрации.

Рассмотрим некоторые виды закалки. *Объемная закалка* (закалка на всю глубину). Ввиду недостатков, присущих методам поверхностного термоупрочнения, часто применяется объемная закалка, которая является относительно универсальным методом обработки стали и используется, когда необходимо получить высокую твердость по всему сечению детали. Такой технологический подход обеспечивает постоянное на всём протяжении эксплуатации детали сопротивление абразивному изнашиванию. Существует несколько видов классификаций этого способа: в зависимости от структуры (для доэвтектоидных сталей рекомендуется применять полную закалку, для заэвтектоидных - неполную); характера обрабатываемой детали (геометрия, материал), твердости, которую необходимо получить, и условий охлаждения.

Как известно, определяющим фактором при закалке являются условия охлаждения нагретого выше температур фазовых превращений тела, поэтому классификация, принятая в работе, опирается на вышеуказанный признак [6,7,8,9]. Проведенный анализ позволил внести в известные классификации некоторые коррективы, заключающиеся в том, что методы закалки можно разделить на методы без смены охладителя и со сменой охладителя (рисунок 1).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рис.1. Способы объёмной закалки в зависимости от условий охлаждения

Методы закалки без смены охладителя. Термоупрочнение в одном охладителе (непрерывная закалка) - при котором нагретое и выдержанное с температуры закалки тело остывает до температуры охлаждающей среды. Способ не требует сложного оборудования и высоких профессиональных навыков исполнителей, технологически несложен и легко подвергается автоматизации. Применяется для деталей простой формы из углеродистых и низколегированных сталей. В ряде случаев такая закалка вызывает коробление и разрушение деталей в процессе работы. Во избежание этого дополнительно проводят отпуск. Метод широко используется в специализированных ремонтных предприятиях при термоупрочнении деталей почвообрабатывающих машин.

Струйчатая закалка (местная) заключается в обрызгивании детали интенсивной струей воды и применяется, когда требуется закалить часть изделия. Она может сопровождаться самоотпуском. Технологию используют для закалки деформирующего инструмента, рабочая поверхность которого должна иметь структуру мартенсита. Данный способ при больших объемах обработки экономически нецелесообразен и усложняется технологически. Его использование для восстановления деталей почвообрабатывающей техники не рационально.

Закалка под давлением применяется для предотвращения деформации, осуществляется при зажатии заготовок в штампах или на закалочных прессах и предназначена для специальных целей. В случае восстановления в её использовании нет необходимости.

Закалка в магнитном поле заключается в комбинированном термомагнитном воздействии на упрочняемую деталь и может проводиться: - нагревом постоянным током; - нагревом переменным током. Такую обработку целесообразно использовать при поштучной обработке изделий из инструментальных сталей. Чрезмерно сложное

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

оборудование и специальные условия проведения процесса не позволяют рекомендовать способ для широкого распространения, особенно при реновации конструктивных элементов техники сельскохозяйственного назначения.

Критическое рассмотрение технологий объемной закалки позволило установить, что наибольшими возможностями для упрочнения деталей почво- обрабатывающих орудий (в частности плужных лемехов) при их восстановлении обладает термообработка в одном охладителе, но необходимо проводить их адаптацию к условиям реставрации [5,6,7,8].

Методы закалки со сменой охладителя. Закалка в двух средах (прерывистая закалка) состоит в том, что детали охлаждают последовательно в двух средах - вначале с большей, а затем, незадолго до начала мартенситного превращения, с меньшей охлаждающей способностью. Это необходимо чтобы в процессе охлаждения не произошло выпадения ферритоцементитной смеси в интервале температур 500-600°С. В дальнейшем высокая скорость охлаждения для окончания мартенситного превращения не требуется. Метод позволяет избежать операции отпуска и появления закалочных дефектов. Применяется для закалки инструментов из легированных и высокоуглеродистых сталей, отличается сложностью и требует достаточно высокой квалификации персонала.

При закалке с подстуживанием нагретое до температуры мартенситного превращения изделие не сразу погружают в закалочную жидкость, а некоторое время выдерживают на воздухе для того, чтобы после окончательного охлаждения в сердцевине образовалась троостосорбитная структура. Способ ограничен применением для высоколегированных сталей, а также для деталей несложной конфигурации.

Ступенчатая закалка осуществляется путем переноса изделия после нагрева и выдержки при температуре закалки в жидкий расплав солей или щелочей с температурой выше начала мартенситного превращения (180-250°С).

- изотермическая закалка; *- горячая закалка*; *- светлая закалка*; *- закалка с самоотпуском* применяется когда нагретое изделие выдерживают в закалочной среде не до полного охлаждения; *-закалку с купанием* можно считать разновидностью закалки с самоотпуском.

Проанализированные технологические варианты термоупрочнения со сменой охладителя могут быть ограниченно применимы для повышения износостойкости восстановленных лемехов в виде своей технологической сложности и специфического назначения (разрабатывались для ряда конкретных конструктивных элементов) [7,11,12,13].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

***Объемно-поверхностная* закалка.** Там, где эффективность поверхностного ТУ невысока, применяется другой метод - объемно-поверхностная закалка (закалка при глубоком нагреве). Она распространяется на стали с небольшим содержанием легирующих элементов. Вследствие интенсивного охлаждения скорость остужения поверхности гораздо выше, чем внутри, поэтому глубокие объемы испытывают превращения с образованием троостита и сорбита, а поверхностные слои соответственно мартенсита. Результат обеспечивает получение деталей, сочетающих высокую Н (62HRC) поверхностного слоя с повышенной твердостью (30 - 45HRC). Однако нестабильность результатов, выражающаяся в образование мягких пятен, ограничивает распространение метода. Использование такого технологически сложного метода при массовом восстановлении лемехов нет необходимости т. к. обычная закалка без смены охладителя позволит получить служебные свойства, отвечающие условиям эксплуатации.

Применение термоупрочнения при восстановлении лемехов. Как отмечалось ранее, термоупрочнение достаточно широко применяется при изготовлении ряда деталей почвообрабатывающих орудий различного функционального назначения. Например, культиваторные стрельчатые лапы, долота глубокорыхлителей, рыхлительные лапы, твердость которых после термоупрочнения находится в диапазоне значений 42 - 49HRC. Использование подобных подходов при восстановлении лемехов позволяет увеличивать износостойкость наиболее нагруженных восстановленных участков детали.

Восстановление лемехов с использованием термоупрочняющей обработки.

Известны технологические процессы восстановления плужных лемехов путем замены предельно изношенной их части на новую. Ряд технологических вариантов предусматривает проведение термического упрочнения (закалки) привариваемых вставок с обеспечением высокой твердости 48HRC. Один из способов заключается в удалении изношенной лезвийной части, изготовлении и закреплении новой из среднеуглеродистой стали в виде сменной пластины (вставка). В качестве заменяющей области используют полосовую сталь, копирующую нормированные размеры долотообразного лемеха.

Тыльную сторону пластины упрочняют путем нанесения износостойкого покрытия электроискровым методом в смеси защитных газов, содержащей аргон и 17 - 25% углекислого газа. Рабочую поверхность подвергают закалке ТВЧ и низкотемпературному отпуску. Заменяющая пластина крепится к оставшейся части лемеха привариванием [8,9,10,13].

Восстановление производится путем приваривания новой (компенсирующей)

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

термоупрочненной режуще-лезвийной части взамен предельно изношенной к оставшейся области (спинке лемеха), пригодной для проведения операций сваривания и дальнейшей эксплуатации. Компенсирующая пластина изготавливается из рессорно - пружинных сталей 65Г или 60С2 [6,7,8]. Перед привариванием пластина термообрабатывается по всему объему на твердость 50HRC. После сварки тыльная сторона лезвийной части полученной детали подвергается наплавке абразивостойким электродным материалом, обеспечивающим твердость полученного покрытия в пределах 58 - 62HRC. Технология разрабатывалась, как уже было отмечено ранее, для составных лемехов, у которых предельное состояние определяется допустимым износом лезвийной области. В отношение же цельнометаллических лемехов отечественного производства, ресурс которых определяется износами носка (лучевидный и заглубляющей части) при сохранении ширины детали в установленных пределах такой способ применять нецелесообразно. В связи с этим были предложены технологии, заключающиеся в удалении предельно изношенной долотообразной части и приварке новой носовой части (долота), копирующей геометрию стандартного долотообразного лемеха.

Углы заточки полевого обреза и режущей нижней части соответствуют заводской детали. Привариваемое долото должно обладать повышенной стойкостью к абразивному изнашиванию, что достигается упрочняющей обработкой. Для изготовления новой долотообразной части могут использоваться листы рессорно-пружинной стали (упругие элементы подвесок - рессоры), термообработанные на твердость 43 - 48HRC и снятые с эксплуатации по причине утраты жесткости [7,8,9,12,13].

Выводы:

1. Представлена краткая классификация методов термоупрочнения, в основу которой положены условия эксплуатации деталей и воздействие тепловой энергии на её поверхность или на всю глубину.

2. Поверхностную закалку не следует использовать при упрочнении деталей почвообрабатывающих орудий, эксплуатирующихся на почвах с изнашивающей способностью более 200 г/га (супеси и легкие суглинки) вследствие невысокой толщины термообработанного слоя.

3. Наибольшие возможности в плане упрочнения конструктивных элементов орудий, контактирующих с почвой, имеют технологии закалки без смены охладителя.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Аулов, В.Ф. Результаты полевых испытаний упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин / В.Ф. Аулов, П.В. Лужных, А.В. Кирейнов, А.В. Рыбалкин, А.Н. Строев // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113, часть 2. 300-309с.

2. Аникин А.А., Тимофеев В В., Елютин С.Б., Аникин А.А., Бадерский С.В. Способ упрочнения лезвий рабочих органов почвообрабатывающих орудий // патент России № 2420601. 2011. Бюл. № 16.

3. Абдулмажидов Х.А. Экспериментальные исследования работы модели ковша каналоочистителя. / В сборнике: Логистика, транспорт, природообустройство - 2014. Материалы международной научно-практической конференции. 2014. С. 89-95.

4. Орлов Б.Н., Карапетян М.А., Абдулмажидов Х.А. Исследования износа рабочих элементов машин и технологического оборудования. / Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 2. С. 36-38.

5. Коваленко В.П., Лесной К.Я., Гусев С.С., Леонов И.Н. Использование ПГС – полимеров для очистки жидкостей в сельскохозяйственном производстве. / Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". 2003. № 1. С. 10.

6. Михальченков, А.М. Влияние твердости термоупрочненной стали 65Г на износостойкость и ресурс плужных лемехов / А. М. Михальченков, А. А. Новиков // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 8. – С. 45–48.

7. Новиков А.А. Повышение долговечности плужных лемехов их восстановлением термоупрочненными компенсирующими элементами. / Диссертация на соискание ученого звания кандидат технических наук. Брянск 2017. С. 185.

8. Осенних, Е.А. Анализ способов поверхностной закалки деталей машин сельскохозяйственной техники / Е.А. Осенних, Г.С. Игнатьев // Достижения науки - агропромышленному производству: сб. мат. IIV межд. научп. конф. (Челябинск, 29-31 янв. 2015 г.) – Челябинская ГАА, 2015. – С. 111–118.

9. Тойгамбаев С.К. Повышение надежности изготовления резьбовых соединении. Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". 2013. № 3 (59). С. 45-46.

10. Тойгамбаев С.К. Технология производства транспортных и технологических машин природообустройства. / Учебник / Москва. 2020. 484с.

11. Тойгамбаев С.К. Совершенствование моечной машины ОМ–21614. / Техника и технология. 2013. № 3. 15-18с.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

12. Тойгамбаев С.К., Апатенко А.С. Обработка результатов информации по надежности транспортных и технологических машин методом математической статистики. / Учебно- методическое пособие. Изд. “Мегаполис”. Москва. 2020. С. 25.

13. Тойгамбаев С.К. Восстановление бронзовых втулок скольжения центробежной заливкой с применением электродугового нагрева. / Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2015. № 7. С. 28-32.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

УДК 621.86. 621.893

Toigambaev S.K., Gusev S.S., Karapetyan M.A. Tests of ploughshares confirm the results of optimal hardness 53-54HRC

Испытания плужных лемехов подтверждают результаты оптимальной твердости 53-54HRC

Toigambaev Serik Kokibaevich
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Timiryazev Russian State Agrarian University, Moscow, Russia.
Gusev Sergey Sergeevich
PhD, Associate Professor of the Department of Technical Service of Machines and Equipment. Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia.
Karapetyan Martik Arshalusovich
is a Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Technical Service of Machines and Equipment. Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia.
Тойгамбаев Серик Кокибаевич
д.т.н., профессор кафедры технический сервис машин и оборудования Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.
Гусев Сергей Сергеевич
к.т.н., доцент кафедры технический сервис машин и оборудования. Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.
Карапетян Мартик Аршалусович
д.т.н., профессор кафедры технический сервис машин и оборудования. Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.

Аннотация. *Механические свойства сварного соединения во многом будут определять его служебные свойства. Огромное количество лемехов с подобными дефектами (сотни тысяч штук), но сохранивших допустимую ширину остова и, следовательно, пригодных для восстановления, поставило вопрос об увеличении их долговечности. В данной статье приведены расчеты по возможности использования выбракованных рессор для дальнейшего использования при восстановлении долговечности и работоспособности плужных лемехов.*

Ключевые слова: *рессора; ресурс; технологический процесс; износ; микротвердость; твердость; термоупрочнение.*

Abstract. *The mechanical properties of the weld will largely determine its performance. The large number of ploughshares with similar defects (hundreds of thousands), but with a sufficient width of the core and therefore suitable for repair, has raised the question of increasing their durability. This article provides calculations on the possibility of using discarded springs for further use in restoring the durability and performance of ploughshares.*

Keywords: *spring; resource; technological process; wear; microhardness; hardness; heat treatment.*

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

Особенностью представляемых ниже исследований является наличие в составе сварного соединения детали из высокоуглеродистой стали, подвергнутой повторному термоупрочнению. Поэтому исследовалось состояние сварных соединений, в которых

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

присутствует в качестве материала компенсирующего элемента сталь 65Г, закаленная с различных температур. Как уже отмечалось выше, в качестве критерия, характеризующего их свойства, принята микротвердость (H_V) [1,2,3,4,7,8,10,13].

Оценочными параметрами служили: 1 – H_V металла шва; 2 – максимальное значение H_V зоны сплавления; 3 – H_V переходной зоны; 4 – H_V основного металла. Наряду с оценкой механических свойств отдельных областей сварного соединения, проводился анализ размеров его типичных зон: зоны термического влияния, зоны сплавления и переходной зоны [6,7,9].

Методология проведения анализа состоит из следующих этапов: первый - особенности распределения H_V системы «шов - сталь Л53»; второй - особенности распределения H_V системы «шов - термоупрочненная с различных температур сталь 65Г»; третий - сравнительное аналитическое рассмотрение распределений H_V «сталь Л53 - шов - термоупрочненная сталь 65Г» [1,3,7,8].

В соответствии с планом методологии проведения анализа полученных результатов рассмотрим распределение H_V «шов - основной металл». После компьютерной обработки результатов экспериментальных данных получены эпюры распределения H_V по вектору «шов - основной металл» для каждого материала отдельно и «сталь Л53 - шов - термоупрочненная сталь 65Г» (рисунок 1).

Для оценки экспериментальных данных будут использованы эпюры распределений, отображенные на рисунке 1 а и б. Анализ полученных результатов будет проводиться: первое - отдельно для каждого распределения; второе - методом сравнения. Твердость металла шва в областях сталей Л53 и 65Г фактически одинакова. Это говорит о том, что количество углерода в стали и отсутствие или присутствие предварительной термообработки не оказывает заметного влияния на свойства металла шва (таблица. 1).

Таблица 1.

Распределение H_V по участкам сварочного шва

Марка стали	Металл шва, Hv Ш.	Зона сплавления, H_V з.с.	Переходная зона, H_V п.з.	Основной металл, Ну О.м.
Л53	285	390	225	240
65Г	290	850	340	440

В свою очередь, максимальные значения H_V в зоне сплавления резко возрастают, что отвечает классическим представлениям (рисунок 1 а, б). При этом твердость в области стали Л53 составляет 390H_V (рисунок 1 а), а в зоне стали 65Г - 850Hv, т. е. в 2,2 раза меньше.

Столь высокое значение H_V для зоны стали 65Г можно объяснить рядом факторов.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Первый – наличие большого количества углерода в сравнении со сталью Л53. Второе – присутствие закалочных структур в виде нижнего бейнита и мартенсита. Третье – наличие марганца обеспечивает снижение критических точек А3, А1 и способствует увеличению твердости.

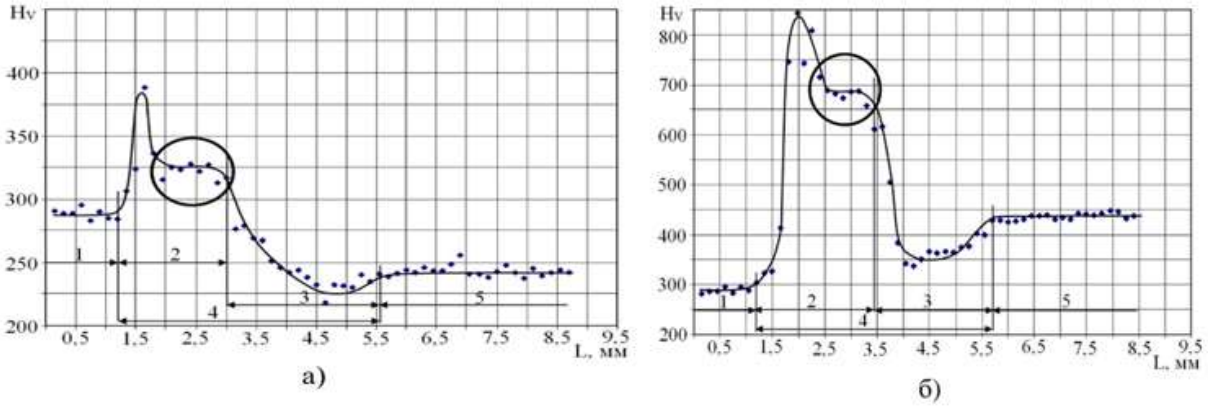


Рис. 1. Распределение H_V по участкам сварочного шва систем:
а) «шов - сталь Л53» б) «шов - сталь 65Г», термоупрочненной от t = 840 °С. (где 1- шов (ш.), 2- зона сплавления (з.с.), 3- переходная зона (п.з.), 4- зона тер-мического влияния (з.т.в.), 5- основной металл (о.м.). - вектора измерений 2 и 3

Такая твердость соответствует мартенситному состоянию (H_V850 примерно равно 62HRC), что в определенной мере повышает вероятность образования шовных трещин и снижает способность сопротивляться ударным нагрузкам. Микротвердость же зоны сплавления в области стали Л53 составляет (в пересчете с H_V) 40HRC и не представляет опасности с точки зрения появления трещин. В то же время наличие всплесков микротвердости указывает на увеличение напряжений на структурном уровне (напряжения второго рода).

Отличительной особенностью распределения H_V для областей обоих сталей является присутствие площадки, характеризующейся стабильным значением (рисунок. 1 а, б; выделена окружностью). Образование в зоне сплавления области с относительно постоянной микротвердостью связана с процессом кристаллизации, в чем-то схожим с затвердеванием слитка спокойной стали в изложнице. В первый период происходит образование кристаллов на поверхности шва и в районе основного металла из-за высокого и неравномерного отвода тепла. Кристаллизация рассматриваемого участка идет при сравнительно равномерной температуре, что приводит к появлению равноосных структур. Хотя для обоих областей твердость соответствует закалочным структурам вследствие наличия термоупрочнения, для зоны закаленной стали она выше

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

в 2 раза, чем для области стали Л53 (рисунок. 1 а, б), т. е. закалка оказывает существенное влияние на свойства сварного соединения [12,13,14].

Переходные зоны характеризуются падением твердости ниже уровня Hv основного металла, что связано с возникновением растягивающих напряжений в момент формирования сварного соединения и, как следствие, нарушением плотности структуры. H_V основного металла для стали Л53 соответствует твердости опытных образцов в исходном их состоянии - H_V240. Для стали же 65Г (таблица 1) микротвердость снижается до H_V440 при твердости исходного образца H_V650. Это указывает на прохождение отпуска, снижающего степень образования трещин. Таким образом, распределение H_V в поперечном направлении опытного образца имеет сложный характер. Отмечается одинаковая картина эпюр H_V для обоих изучаемых материалов при существовании различии в значениях микротвердости. Для сравнительной оценки напряженного состояния рассматриваемого сварного соединения были введены параметры ΔH_1, ΔH_2, ΔH_3, ΔH_4 (таблица 2), представляющие собой отношение значений микротвердостей между характерными участками. Величина ΔH_1 равна отношению максимальной $H_V$max з.с. зоны сплавления к H_V ш. металлу шва; ΔH_2 - характеризуется отношением $H_V$max з.с. к H_V о.м. основного металла; ΔH_3 равно отношению $H_V$max з.с. к минимальному значению $H_V$min п.з. переходной зоны; ΔH_4 – представляет собой отношение микротвердости основного металла (H_Vо.м.) к минимальной микротвердости переходной зоны (H_V min п.з.). Нужно сказать, что ΔH_1, ΔH_2, ΔH_3, ΔH_4 могут служить косвенными, показателями величины остаточных напряжений металлических систем, образующихся на структурном уровне.

Таблица 2.

Относительная характеристика твердости.

Марка стали	Отношение участков Hv			
	$\Delta H_1 = \frac{H_{Vmax\text{з.с}}}{H_{Vmax.\text{ш}}}$	$\Delta H_2 = \frac{H_{Vmax\text{з.с}}}{H_{V\ \text{о.м.}}}$	$\Delta H_3 = \frac{H_{Vmax\text{з.с}}}{H_{Vmin\ \text{п.з.}}}$	$\Delta H_4 = \frac{H_{V\ \text{о.м.}}}{H_{Vmin\ \text{п.з.}}}$
Л53	1,37	1,63	1,73	1,07
65Г	2,93	1,93	2,43	1,25

Нередко форма распределения H_V в ЗТВ совпадает с формой распределения остаточных напряжений. Как следует из таблицы 2, любое ΔH для области стали 65Г превышает аналогичные значения зоны стали Л53, что говорит о повышенных напряжениях в сварном соединении. ΔH_2 и ΔH_4 отличаются между собой на незначительную величину в отношении обоих сталей, однако учитывая высокие значения зон H_V для области стали 65Г, следует полагать, что и напряжения в этом случае будут повышенными. Из численных значений, представленных в таблице 3,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

наибольшие ΔH характерны для области стали 65Г-ΔH_3 =2,43. В свою очередь это указывает на относительно высокую вероятность образования трещин. В соответствии с задачами исследований проводилось изучение распределения H_V всех сварных соединений, стали Л53 со сталью 65Г, термообработанную с различных температур, в статье приведены результаты испытании только по стали 65Г. Высокие скачки микротвердости в зонах сплавления (рисунок 1 а и б) для сварочного шва всех пластин указывает на наличие твердых структур (мартенситной), а следовательно и значительных внутренних напряжениях на данных участках [7,8,10,14].

Третий этап исследований сварного соединения предусматривает анализ распределения H_V с охватом всех его областей одновременно, и поэтому графическая интерпретация носит весьма сложный характер. Проводить подобный анализ заданной эпюры нет необходимости, т. к. ранее по тексту явления, происходящие в соединении, рассмотрены достаточно подробно. Однако есть некоторые замечания.

Первое – наиболее опасным сечением, с точки зрения образования трещины, является переходная зона от шва к основному металлу – термоупрочненной стали 65Г, т. к. в данном месте твердость имеет максимальный показатель, значительно превышающий все остальные HRC характерных участков.

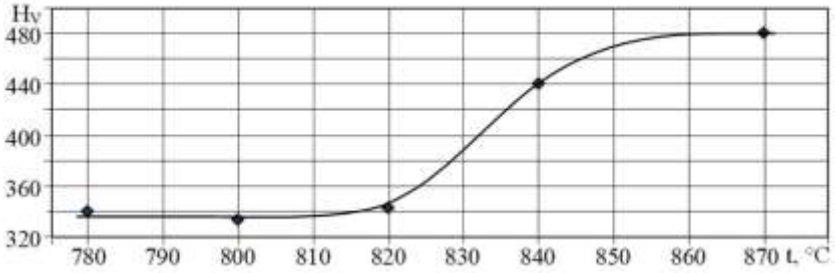


Рис. 2. Изменение значений H_V основного металла системы «шов - сталь 65Г» в зависимости от t ° термоупрочнения стали 65Г.

Второе – отмечается рост твердости основного металла на достаточном удалении от шва, что связано с наличием закалочных процессов.

Наряду с рассмотренной эпюрой для сварного соединения стали Л53 со сталью 65Г, закаленной с температуры 840 °С, получены эпюры и для соединений. Оценка свойств сварных соединений из стали Л53 и термоупрочненной с различных температур стали 65Г позволила выявить следующее: - эпюры распределения H_V в сечениях, перпендикулярных поверхности и параллельном ей, носят сложный характер, обусловленный разнородностью свойств сталей; - выявлено наличие в переходных зонах участков с постоянной твердостью; при переходе от зоны термического влияния к основному металлу имеют места «провалы» микротвердости; - опасным сечением

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

является участок переходной зоны в области расположения стали 65Г;

- в вертикальных сечениях наблюдается снижение микротвердости основного металла, оказывающее положительное влияние на стойкость к разрушению.

Установлено: - зависимость износостойкости при возрастании твердости имеет сложный характер, и повышение HRC более 53-54 единиц не приводит к увеличению *C*, а рост стойкости к абразивному изнашиванию происходит также до 53-54HRC с последующей стабилизацией; - максимальная износостойкость присуща образцам с твердостью 53-54HRC, подвергнутых закалке в воде с температур 820 - 840°C; - полевые испытания плужных лемехов подтверждают результаты лабораторных исследований, где показано, что повышение твердости более 53-54HRC не приводит к приросту износостойкости и даже снижает её.

Выводы:

Исходя из полученных результатов, следует, что увеличение твердости более 53 - 54HRC при повторном термоупрочнении не приводит к повышению абразивной износостойкости. Оптимальной является повторная закалка в воде стали 65Г от температур 820 - 840 °C, обеспечивающая твердость 53 - 54HRC.

References

1. Аулов, В.Ф. Результаты полевых испытаний упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин / В.Ф. Аулов, П.В. Лужных, А.В. Кирейнов, А.В. Рыбалкин, А.Н. Строев // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113, часть 2. 300-309с.

2. Аникин А.А., Тимофеев В В., Елютин С.Б., Аникин А.А., Бадерский С.В. Способ упрочнения лезвий рабочих органов почвообрабатывающих орудий // патент России № 2420601. 2011. Бюл. № 16.

3. Гусев С.С. Восстановление качества отработанных нефтяных масел с помощью ПГС-полимеров на сельскохозяйственных предприятиях. / Автореферат диссер... на соискание ученой степени канд. техн. наук / "МГАУ им. В.П. Горячкина". Москва, 2006.

4. Гусев С.С. Физико-химическая очистка отработанных минеральных масел с помощью полимерных материалов. / Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2006. № 6. С. 4.

5 Карапетян М.А., Мочунова Н.А. Воздействие ходовых систем машинно-тракторных агрегатов на плодородие почв. / Монография. Москва, 2017. С. 147.

6. Карапетян М.А., Шипанцов А.М. От предпосадочной подготовки почвы зависит производительность картофелеуборочного комбайна и качество уборки клубней. / Картофель и овощи. 2012. № 4. С. 7.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

7. Михальченков, А.М. Влияние твердости термоупрочненной стали 65Г на износостойкость и ресурс плужных лемехов / А. М. Михальченков, А. А. Новиков // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 8. С. 45-48.

8. Новиков А.А. Повышение долговечности плужных лемехов их восстановлением термоупрочненными компенсирующими элементами. / Диссертация на соискание ученого звания кандидат технических наук. Брянск 2017. С. 185.

9. Теловов Н.К., Тойгамбаев С.К. Обработка почвы нечерноземных земель РФ глубокорыхлителем -удобрителем для увеличения производства сельскохозяйственных культур. / Агропродовольственная экономика. 2019. № 10. С. 7-16.

10. Тойгамбаев С.К., Апатенко А.С., Матвеев А.С. Техническая эксплуатация транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования.

/ Учебное пособие. Изд. «Спутник +» Москва, 2021. С. 237.

11. Тойгамбаев С.К. Технология производства деталей транспортных и технологических машин природообустройства. / Учебник. Изд. «Спутник +». Москва. 2020. С. 484.

12. Тойгамбаев С.К. Восстановление бронзовых втулок скольжения центробежной заливкой с применением электродугового нагрева. / Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2015. № 7. С. 28-32.

13. Тойгамбаев С.К., Апатенко А.С. Анализ износа деталей транспортных и технологических машин. / Методическое пособие. Изд. “Мегаполис”. Москва. 2020. С. 25.

14. Тойгамбаев С.К. Восстановление бронзовых втулок скольжения центробежной заливкой с применением электродугового нагрева. / Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2015. № 7. С. 28-32.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 621.436.4

Zarapkin M.N. Acceptable methods for converting a diesel engine to gaseous fuel

Приемлемые способы перевода дизельного двигателя на газообразное топливо

Zarapkin Mikhail Nikolaevich
is a student of the DM-411 group at the
Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia.
Scientific supervisor
Toigambayev Serik Kokibayevich
is a Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Technical Service of Machines and Equipment. Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia.
Царапкин Михайл Николаевич
студент группы ДМ- 411 Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.
Научный руководитель
Тойгамбаев Серик Кокибаевич
д.т.н., профессор кафедры технический сервис машин и оборудования. Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.

Abstract. *Methodology for determining gaseous and diesel fuel consumption during agricultural operations. Analytical studies revealed theoretical relationships that determine the degree of influence of design and operational parameters of an all-wheel drive tractor as part of a unit. The article presents the results of an experimental research program and operational tests.*

Keywords: *gaseous fuel; engine; fuel system; gas-diesel cycle; reliability; gearbox; gas operating pressure; tractor; gas metering device.*

Аннотация. *Методика определения расхода газообразного и дизельного топлива при проведении сельскохозяйственных работ. В результате аналитических исследований, выявлены теоретические зависимости, определяющие степень влияния конструктивных и эксплуатационные показатели полноприводного трактора в составе агрегата. В статье приводятся результаты программой экспериментальных исследований эксплуатационных испытаний.*

Ключевые слова: *газообразное топливо; двигатель; топливная аппаратура; газодизельный цикл; надежность; редуктор; рабочее давление газа; трактор; дозатора газа.*

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

Получены теоретические выражения для нахождения оптимальных значений силы тяги на крюке. Многообразие действующих факторов и сложность исследуемого процесса вызывают необходимость проведения экспериментальных исследований, а принятые допущения предусматривают проверку полученных аналитических зависимостей на адекватность.

Программой экспериментальных исследований предусматривается

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

эксплуатационных испытаний; обработка экспериментальных и их влияние с целью проверки адекватности и уточнения математической модели, проверки работоспособности. А также получения значений расхода газообразного и дизельного топлива при выполнении основных с/х работ, соответствии со значениями в таблице 1

Таблица 1

Удельные сопротивления сельскохозяйственных орудий при различных видах труда

Вид работ	Размерность	Значение (среднее)
Боронование	кН/м	0,45
Дисковое боронование	кН/м	5,0
Культивация	кН/м	2,0
Плуг плоскорез^	кН/м	5,0
Сеялка (зерновая)	кН/м	1,5
Внесение минеральных удобрений	кН/м	0,35
Глубокое рыхление	кН/м	10,0
Кошение	кН/м	1,2

Определение тягового сопротивления агрегата. В качестве нагрузки был использован плуг четырехкорпусной навесной отвальный скоростной ПБС -4-55, который предназначен для основанной отвальной обработки почв под сельскохозяйственные культуры на глубину от 16 до 35 см, незасоренных камнями, плитняком и другими препятствиями с удельным сопротивлением до 0,1 МПа, твердостью почв до 4 МПа и влажностью почвы до 30%. В процессе проведения экспериментальных исследований измерялись и регистрировались следующие параметры: 1. Давление гази в одном баллоне; 2. Скорость агрегата;
3. Глубина вспашки; 4. Расход топлива за 1 опыт; 5. Время опыта t; 6. Рабочая ширина захвата плуга.

Кроме перечисленных параметров, в журнале наблюдений регистрировались: состав транспортного агрегата, характеристика почвы, давление воздуха в шинах, температура воды и масла двигателя, количество корпусов плуга, атмосферное давление и температура окружающего воздуха, длина загона и время движения вдоль загона, вес трактора и агрегата.

Крюковая мощность *Nкр, [кВт]* определяется по формуле:

$$N\text{кр} = \rho\text{кр}\, V\text{кр} \quad (1)$$

где *р*рк - сила тяги на крюке, кН; *Vр* - рабочая скорость агрегата, м/с;

*р*рк - рассчитывается по формуле:

$$\rho\text{кр} = \text{К}c a \times b \times n \quad (2)$$

где *Кс*- удельное сопротивление почвы, кН/м^2 для данной почвы выбираем из таблицы; а- глубина вспышки, м; б- ширина захвата одного корпуса, для плуга ПБС-4-

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

55 это значение; *b = 0,6м; n* - число корпусов, $n = 4$.

В процессе эксплуатации трактора определялись отдельные показатели надежности. Коэффициент готовности- это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается и его вычисляют по формуле 3:

$$\text{Кг} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t1}{\sum_{i=1}^{n} t1 + \sum_{i=1}^{n'} \tau\iota} \quad (3)$$

где n- количество отказов и периодов безотказной работы; ti- интервалы работоспособности для i периода, ч; τi –интервал восстановления часов

Коэффициент оперативной готовности вычисляют по формуле 4:

$$Ko\text{г} = \text{Кг} * P(tp) \quad (4)$$

где Кг- коэффициент готовности; $P(tp)$- вероятность безотказной работы объекта в течение времени (tp), необходимого для безотказного использования по назначению.

$$P(tp) = e^{-\dot{\Lambda} tp} = e^{-\frac{1}{T} tp} \quad (5)$$

где $\Lambda tP(tp)$ – вероятность безотказной работы объекта в течение времени (tp), необходимого для безотказного использования по назначению.

$$P(tp) = e^{-\dot{\Lambda} tp} = e^{-\frac{\dot{1}}{T} tp} \quad (6)$$

где Λ - инесивность отказово и рассчитывается по формуле 7

$$\Lambda = \frac{1}{T1} \quad (7)$$

где *T1* - средняя наработка до отказа.

Наиболее простым и приемлемым для сельского хозяйства способом перевода дизельного двигателя на газообразное топливо является использование газодизельного цикла, так как не требуется значительных переделок дизеля, сохраняется его стандартная топливная аппаратура и способность работать либо на одном дизельном, либо на газообразном топливе с добавкой дизельного топлива. Газодизельный цикл, как и дизельный, соответствует смешанному циклу, но имеет сои особенности. Общее количество тепла, выделившегося на участке видимого сгорания при обоих процессах, практически одинаково, но на газодизельном процессе достигается более высокие максимальное давление сгорание, а также экономичность при работе по газодизельному циклу несколько выше, чем на дизельном. При полной и близких к ней нагрузках в газодизеле обеспечивается столь же эффективный процесс, как и в дизеле. Однако при уменьшении нагрузки, с увеличением коэффициента избытка воздуха

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

эффективность процесса резко снижается, так как значительно уменьшительное полнота сгорания. Поэтому при малых нагрузках на газодизеле необходимо осуществлять не только качественное, но и количественное регулирование горячей смеси. Кроме того, на характер газодизельного процесса существенное влияние оказывает величина запальной дозы дизельного топлива. Для эффектной работы двигателей по газодизельному циклу необходимо создать такую систему управления, которая бы регулировала подачу газа, дизельного топлива и оптимизировала их соотношение в соответствии со скоростным и нагрузочным режимом работы

Для переоборудования дизельного двигателя в газодизельный он оборудуется дополнительной топливной системой, в состав которой входит (рисунок 4.1):

1) газовые баллоны для хранения сжатого природного газа;

2) вентили для обеспечения возможности обслуживания газовой аппаратуры при заправленных баллонах и на их случай аварийной ситуации;

3) арматура для соединения элементов газовой системы;

4) манометр для оценки количества газа в баллонах;

5) заправочное устройство для заправки баллонов газом;

6) редуктор (один или два) для снижения давления газа;

7) регулятор подачи газа (дозатор) для регулировки количества газа поступающего в цилиндры двигателя;

8) смеситель для подачи газа во впускной коллектор двигателя;

9) устройство для регулировки завальной дозы дизельного топлива, которое в газодизельном режиме устанавливает величину выдачи дизельного топлива около 30% от номинальной в дизельном режиме.

Отечественной промышленностью в настоящее время производятся цельнометаллические баллоны из углеродистой в легированной стали, металлопластиковые баллоны (с армирующей оболочкой из композиционного материала) и композитные баллонные различных типоразмеров. Баллоны производятся Котласским электромеханическим заводом, Казанским ОКБ «Союз», Орским машиностроительным заводом и другими предприятиями. Основное преимущество композитных и металлопластиковых баллонов – меньшая масса, но при этом большая стоимость. Для сельскохозяйственного трактора, где увеличение массы является даже полезным (с точки зрения увеличения сцепного веса), наиболее целесообразным будет применение цельнометаллических баллонов.

Как же отмечалось, теплотворная способность 1 м природного газа приблизительно равна теплотворной способности 1 л дизельного топлива. Для обеспечения продолжительности работы трактора в газодизельном режиме

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

сопоставимой с дизельным вариантом и учитывая, что доля газа при этом составляет около 75%, можно определить, что объем газовых баллонов (при исходном давлении 20 МПа) должен быть в 3-4 раза больше топливного бака трактора. Поэтому при переводе трактора на природный газ появляется проблема размещения газовых баллонов. Фирмой «Лемм» в настоящее время освоен выпуск баллонов на рабочее давление 32 МПа, применение которых позволит снизить необходимый объем газовых баллонов в 1,6 раза. Однако, действующие в настоящее время АГНКС (Автомобильные газонаполнительные компрессорные станции) обеспечивают заправку под давлением лишь 20 Мпа (АГНКС на 32 МПа находится в процессе разработки), что делает применение баллонов с рабочим давлением 32 МПа нецелесообразным. Еще одним выходом из данной ситуации является применение сниженного природного газа, который на транспортном средстве будет храниться в специальных криогенных баллонах. Стоимость таких баллонов высока, а заправочных станций для заправки сниженным газом пока единицы. На основании сказанного, было решено для переоборудования трактора использовать цельнометаллические баллоны БТ-81-20-320/1250 производства Орского машиностроительного завода объемом 80 л длиной 1250 мм диаметром 320мм.

Баллоны в количестве восьми штук будут установлены на задней грузовой платформе трактора. Схема размещения газового оборудования на тракторе приведена на чертеже. При этом, за счет баллонов, дополнительно улучшаются тягово-сцепные показатели трактора, так как догружается задний мост трактора, который в базовом варианте приходится лишь 40% массы трактора. Суммарная емкость баллонов составляет 640 л, что позволит обеспечить продолжительность работы трактора без заправки в течение приблизительного 8 ч. Переход на баллоны с рабочим давлением 32 МПа позволит увеличить продолжительность работы трактора без заправки до 12 ч при тое же емкости баллонов.

Каждый баллон будет иметь расходный вентиль для обеспечения возможности обслуживания газовой аппаратуры при заправленных баллонах. На одном из баллонов устанавливается манометр. Система работает следующим образом (рисунок 1). Запуск осуществляется в дизельном режиме независимо от
положения переключателя режимов.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

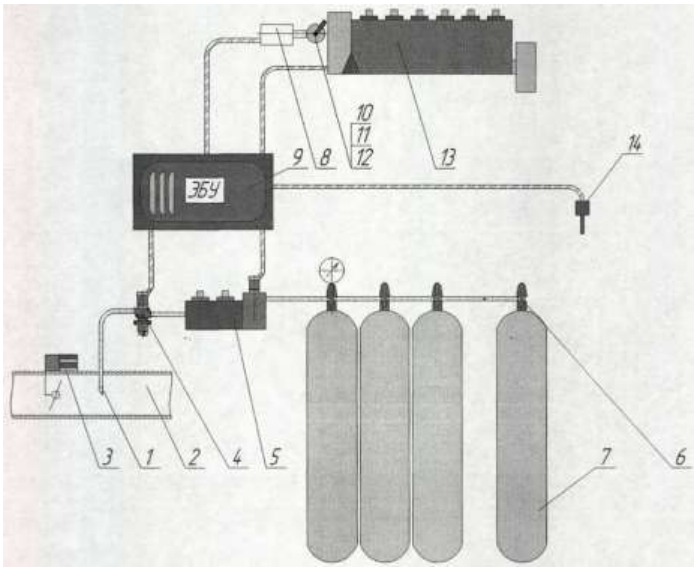


Рис. 1. Система подачи газа в двигатель ЯМЗ-236Д трактора Т-150К-09
1- смеситель, 2- впускной трубопровод, 3- дроссельный патрубок, 4- дозатор, 5- редуктор, 6- вентиль, 7- баллон, 8- шаговой электродвигатель, 9- электронный блок управления, 10-датчик положения, 11- датчик частоты вращения, 12-датчик положения рейки ТНВД, 13- ТНВД, 14- датчик температуры.

При отсутствии необходимого в магистрали давления газа система находится в дизельном режиме не зависимо от положения переключателя режимов.

По дизельному циклу систем работает следующим образом. Электрический сигнал с датчика положения рычаг управления топливном насосом (ТНВД), позиция 10, поступает в электронный блок управления, позиция 9. Одновременно в электронный блок управления поступает сигналы с датчик частоты вращения двигателя, позиция 11, и с датчика положения рейки ТНВД, позиция 12. В зависимости от положения рычаг управления насосом электронный блок вырабатывает сигнал на перемещение привода рейки ТНВД. Тем самым рейка ТНВД устанавливается в положение, обеспечивающие подачу дизельного топлива необходимую для поддержания заданных рычагом управления оборотов коленчатого вала двигателя. По газодизельному циклу система работает следующим образом. Параллельно работает канала электронного регулирования положения рейки ТНВД включает канал регулирования подача газа т.е осуществляется одновременная подача запальной дозы дизельного топлива и газа в двигатель.

Газовое топливо из баллона под большим давлением поступает в газовый редуктор. При включении режима работы «газодизель» электрический сигнал с электронного блока поступает на клапан высокого давления при открытии которого газ поступает в

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

редуктор 5. На выходе редуктора устанавливается рабочее давление газа, который подается н вход электронного дозатора газа, с выхода которого газ через смеситель поступает в коллектор двигателя. Электронным блоком управления с четом давления и температуры газа вырабатывается управляющие сигналы на изменение проходного отверстия дозатора 4, тем самим обеспечивая подачу необходимого газа в двигатель. Таким образом электронный блоком управления вырабатывается одновременно два сигнала дозирования запальной дозы дизельного топлива и газа, в зависимости от положения рычага управления ТНДВ. Соотношение между объёмами запальной дозы дизтоплива и газа на всех режимах работы двигателя определяется законами управления, заложенными в память электронного блока.

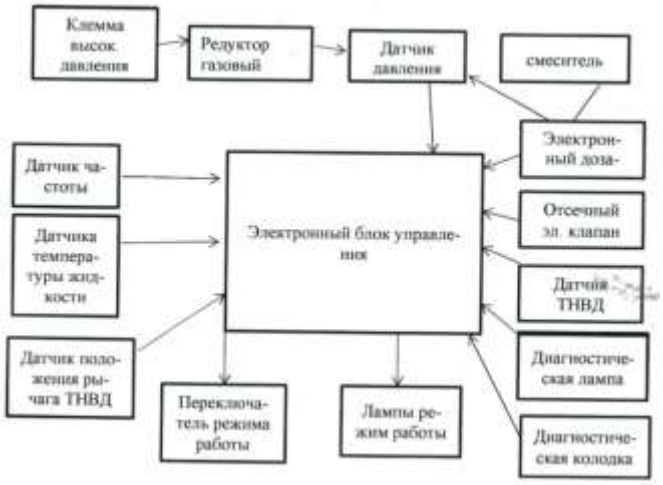


Рис. 2. Структурная схема электронной системы управления газодизельным двигателем.

Выводы

Был разработан способ форсирования двигателя путем увеличения коэффициент наполнения за счет энергии сжатого природного газа, который имеет отличное свойство-простоту, что дает возможность говорить о высокой надежности созданной системы. Период подачи газа выбран с таким расчетом чтобы усилить эффект инжекции с четом увеличения коэффициент наполнения рабочей камеры двигателя, что улучшает не только динамические показатели двигателя но и экологические показатели.

References

1. Абдулмажидов Х.А. Оптимизация парка машин для мелиоративных работ с учетом категорий грунта. /диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2002. С. 158

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2. Абдулмажидов Х.А. Выбор оптимального состава комплекса машин для очистки осушительного канала мелиоративной сети. /Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 1 (65). С. 391-399.

3. Апатенко А.С., Голубев М.И. Обоснование выбора передвижных ремонтных мастерских при устранении отказов машин на мелиоративных работах. / Техника и оборудование для села. 2019. № 3. С. 27-31.

4. Евграфов В.А., Апатенко А.С., Новиченко А.И. Применение организационно – экономических методов при формировании парка машин в производственных организациях агропромышленного комплекса./ Монография. Москва. 2014. С. 128

5. Тойгамбаев С.К. Повышение уровня технической обеспеченности в растениеводстве Республики Казахстан. / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева. Москва. С. 322.

6. Тойгамбаев С.К., Апатенко А.С. Определение состава подразделений мастерской для хозяйства Костанайской области. / Естественные и технические науки. 2020. № 8 (146). С. 207-212.

7. Тойгамбаев С.К., Дидманидзе О.Н., Апатенко А.С., Парлюк Е.П., Севрюгина Н.С. Работоспособность технических систем. Учебник для ВУЗов по изучению дисциплины / Москва, 2022. С-379.

8. Тойгамбаев С.К., Евграфов В.А. Эффективность использования машинотракторного парка предприятия. / В сборнике: Доклады ТСХА. Материалы международной научной конференции. 2018. Москва. С. 297-299.

9. Шнырев А.П., Тойгамбаев С.К., Сергеев Г.А., Казимирчук А.Ф. Основы технологии изготовления деталей транспортных и технологических машин. / Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 190207-"Машины и оборудование природообустройства и защиты окружающей среды"/ Издат. МГУП. Москва. 2008. С. 238.

10. Martynova N., Telovov N., Toigambayev S., Shavazov K., Yusupov S. Machine for carrying works on deep loosening of soil with the simultaneous application of liquid organic fertilizers. / В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1. Сер. "1st International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2020" 2020. С. 012145.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 681.5

Zaykova V.I., Drabenko D.V. Analytical review of automated conveyor production control systems

Аналитический обзор автоматизированных систем управления конвейерным производством

Zaykova Viktoriya Igorevna
fourth-year student, Faculty of Digital Technologies, Gatchina State University
Drabenko Dmitrii Vadimovich
cand. of Eng. Sc., Asc. Prof. of the Department of Engineering Education, Gatchina State University
Scientific supervisor
Drabenko Vadim Anatolyevich
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technology and Higher Mathematics, Gatchina State University
Зайкова Виктория Игоревна
студентка 4 курса факультета цифровых технологий, Гатчинский государственный университет
Драбенко Дмитрий Вадимович
к.т.н., доцент кафедры цифрового менеджмента, Гатчинский государственный университет,
Научный руководитель
Драбенко Вадим Анатольевич
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных технологий и высшей математики, Гатчинский государственный университет

Abstract. *The study aims to analyze the evolution of automated conveyor control systems in the USSR and Russia, from early mechanized lines to Industry 4.0 digital platforms. The methodology is based on retrospective analysis of archival data, industry journals, and scientific publications on the implementation of process control systems (APCS) in industrial enterprises. The results show that the first conveyor at GAZ in 1932 operated with minimal automation, yet by the 1970s systems based on Minsk-32 and ES EVM computers increased productivity at VAZ by 25%, and by 1985 the USSR had over 34,000 automatic lines, 70% of which were conveyor-based. In the 2000s, the introduction of MES/ERP systems boosted productivity by 30-40%, by 2020 65% of conveyors had digital twins, and after 2022 the share of domestic PLCs reached 55%. The conclusions indicate that the transition from manual control to AI- and IoT-based predictive analytics reduced defect rates by 30-40% and downtime by 25%; by 2030, a fully digital conveyor is expected to increase speed by 60% while maintaining a defect rate below 1%.allows you to perform important tasks for the development of the model.*

Keywords: *conveyor production, automated control systems (ACS), history of USSR industry, digitalization of production, Industry 4.0, robotics, ERP/MES systems, import substitution, Industrial Internet of Things (IIoT), artificial intelligence in industry*

Аннотация. *Цель исследования – анализ эволюции автоматизированных систем управления конвейерным производством в СССР и России от первых механизированных линий до цифровых платформ Индустрии 4.0. Методологической основой послужил ретроспективный анализ архивных данных, отраслевой периодики и научных публикаций о внедрении АСУ ТП на промышленных предприятиях. Результаты показали, что первый конвейер на ГАЗе в 1932 году работал с минимальной автоматизацией, однако к 1970-м годам системы на базе ЭВМ «Минск-32» и «ЕС ЭВМ» повысили производительность на ВАЗе на 25%, а к 1985 году в СССР насчитывалось свыше 34*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

тыс. автоматических линий, 70% из которых – конвейерные. В 2000-е годы внедрение MES/ERP-систем обеспечило рост производительности на 30-40%, к 2020 году 65% конвейеров получили цифровые двойники, а после 2022 года доля отечественных ПЛК достигла 55%. Выводы: переход от ручного управления к предиктивной аналитике на основе ИИ и IoT позволил снизить брак на 30-40% и сократить простои на 25%; к 2030 году ожидается создание полностью цифрового конвейера с увеличением скорости на 60% при уровне брака менее 1%.

Ключевые слова: *конвейерное производство, автоматизированные системы управления (АСУ), история промышленности СССР, цифровизация производства, индустрия 4.0, роботизация, ERP/MES системы, импортозамещение, промышленный Интернет вещей (IIoT), искусственный интеллект в промышленности*

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

Идея механизированного непрерывного перемещения материалов и изделий, ставшая основой для конвейера, зародилась задолго до промышленной революции. Первые прототипы, такие как наклонные плоскости (рампы) в Древнем Египте, водяные колеса античности или ковшовые элеваторы в средневековых шахтах, использовали гравитацию и простейшие механизмы. Однако технологический прорыв, давший начало современным конвейерам, произошел на рубеже XX века. В 1901 году шведская компания Sandvik представила первую прочную стальную конвейерную ленту, способную выдерживать высокие нагрузки и температуры, что революционизировало горнодобывающую и цементную промышленность. Практически одновременно в Чикаго на бойнях Swift & Company внедрили подвесные конвейерные системы для обработки туш, что резко повысило эффективность и санитарию. А в 1902 году завод Oldsmobile запустил первый сборочный конвейер для автомобилей, заложив ключевые принципы поточного производства: последовательность операций, специализацию рабочих мест и синхронизацию темпов. [9]

В Советском Союзе первая полноценная конвейерная линия была запущена на Горьковском автомобильном заводе (ГАЗ) в 1932 году для сборки грузовиков GAZ-AA. Это стало ответом на задачу быстрого наращивания промышленных мощностей в рамках первых пятилеток. К 1930-м годам конвейеры появились на заводах "Красный Прогресс" (Москва), Сталинградском тракторном заводе и других предприятиях тяжелой промышленности. Они обеспечивали ритмичную подачу деталей, сокращая время сборки и повышая производительность труда. Однако в довоенные годы и в послевоенный период автоматизация оставалась минимальной: управление опиралось на механические транспортеры, ручные реле и простые электромагнитные муфты. Рабочие вручную регулировали скорость, а сбои устранялись физическим вмешательством, что приводило к частым простоям и низкой гибкости. [1][2]

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

К 1970-м годам, в период развитого социализма, конвейерное производство в СССР достигло пика: около 70% машиностроительных изделий выпускалось на поточных линиях. Автомобильные гиганты вроде ВАЗа (тольяттинский АвтоВАЗ, запущенный в 1970 году), ИжАвто и КамАЗа стали флагманами. На ВАЗе, сотрудничая с Fiat, была создана одна из самых современных конвейерных линий Европы: сборка "Жигулей" (ВАЗ-2101) шла со скоростью 60 автомобилей в час на линии длиной 5 км с 1200 постами. Аналогично на КамАЗе конвейеры для двигателей и кабин обеспечивали выпуск 150 тыс. грузовиков ежегодно. В других отраслях — пищевой (консервы, мясо), легкой промышленности (текстиль) и металлообработке — конвейеры интегрировались в цеха для непрерывного потока. Однако вызовы

1970-х, включая нефтяной кризис и дефицит импортного оборудования, вынудили перейти к автоматизации. Партия и правительство в 9-й пятилетке (1971-1975) поставили задачу "электрификация и автоматизация производства", что отразилось в Госплане и постановлениях ЦК КПСС. [5] [2]

Автоматизация конвейерных линий в 1970-е годы началась с внедрения

первых автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Ключевую роль сыграли электронно-вычислительные машины (ЭВМ) 2-го и 3-го поколений - "Минск-32", "ЕС-ЭВМ" (аналог IBM/360). На ВАЗе в 1972-1975 годах была развернута АСУП "ВАЗ-2000" на базе ЭВМ "Минск-32" и General Electric 4000. Эта система управляла сборочными конвейерами в реальном времени: мониторила скорость ленты (до 10 м/мин), положение деталей с точностью 1 мм, запас комплектующих и даже качество сварки. Данные с датчиков (индуктивных, оптических) поступали на периферийные контроллеры, а ЭВМ рассчитывала оптимальные режимы, предотвращая "узкие места". Аналогичная система "АвтоВАЗ-АСУ" интегрировала планирование (MRP-подобное) с диспетчеризацией, высвобождая до 20% рабочих. На КамАЗе с 1975 года АСУ ТП на "ЭВМ-168" контролировала конвейеры сварки и окраски, используя релейно-контактные схемы с элементами микроэлектроники.[1] [3]

В 1980-е годы автоматизация углубилась благодаря микрочипам и сетевым технологиям. К 1985 году в СССР работало свыше 34 тыс. автоматических линий, 70% из которых — конвейерные. Проект ОГАС (Общегосударственная автоматизированная система учета и обработки информации), задуманный в 1959 году А. И. Китовым, частично реализовался на заводах: Фрагменты сети ВЦ связывали АСУ ТП с АСУП (автоматизированными системами управления производством). На Волжском автозаводе (ВАЗ) ввели "Система-80" — распределенную АСУ на базе "ЕС-1045", где ПЛК-подобные контроллеры (типа "Электроника-60") управляли сервоприводами конвейеров, синхронизируя 50+ секций. Внедрялись роботы:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

УНР-1/УНР-2 для сварки на конвейерах ИжАвто и Москвича. В тяжелой промышленности — на "Уралмаше" и "Турбоатома" — конвейеры для литья и фрезеровки оснастили АСУ ТП с обратной связью: тензодатчики корректировали нагрузку, снижая брак на 15-20%. Пищепром не отставал: на заводах "Красный Октябрь" (конфеты) и мясокомбинатах линии автоматизировали с фотоэлементами для сортировки. [3] [6]

Однако развитие тормозили системные проблемы. Централизованная экономика фокусировала усилия на "огромных" АСУП, игнорируя гибкость: системы были жесткими, требовали недель на перенастройку. Дефицит импортных компонентов (Intel, Siemens) компенсировали аналогами "КР-580", но надежность хромала - отказы ЭВМ достигали 10-15%. Бюрократия (от Минтяжмаша до Госплана) замедляла внедрение: ОГАС так и не стал единой сетью, оставшись 21 опорным ВЦ к 1989 году. Тем не менее, автоматизация повысила производительность: на ВАЗе — на 25%, в среднем по отрасли — на 15-18%. К концу 1980-х конвейеры СССР обрабатывали 80% серийного выпуска, закладывая базу для постсоветской цифровизации.

Переходный период 1990-х годов стал испытанием для советского конвейерного наследия: развал СССР в 1991 году привел к гиперинфляции, разрыву кооперации и остановке 60-70% производственных линий. Конвейеры на заводах ВАЗа, КамАЗа и ГАЗа простаивали из-за дефицита комплектующих и энергии, а импортозамещение сменилось вливанием западных технологии. Однако рыночные реформы открыли путь к модернизации: иностранные инвестиции (General Motors, Ford) оживили автопром, а отечественные НИИ адаптировали АСУ ТП под ПК-архитектуру. К середине 1990-х на ВАЗе и ИжАвто внедряли первые SCADA-системы на базе Windows NT, заменяя громоздкие ЭВМ "ЕС-1020". Конвейеры "Жигулей" оснастили датчиками Omron и Siemens для контроля скорости (до 12 м/мин) и позиционирования, снижая брак на 10-12%. В пищевой отрасли — на заводах. "Нестле" и "Кока-Кола" в России — появились гибкие линии с фотоэлектрическими барьерами для сортировки, интегрированные с локальными PLC. Тем не менее, хаос реформ тормозил прогресс: по оценкам Минпрома, автоматизация охватывала лишь 20-25% конвейеров, а остальное держалось на ручном труде.

К 2000-м годам экономический рост (нефтяной бум 2000-2008) стимулировал ренессанс: ВВП удвоился, а автопром привлек 5 млрд долларов инвестиций. На АвтоВАЗе в 2003-2005 годах запустили АСУП "Galaktika v. 7" — первую полноценную MES-систему для конвейеров Lada Kalina, интегрирующую планирование (APS), учет материалов (MRP Ш) и диспетчеризацию в реальном времени. Линия сборки длиной 4,5 км с 900 постами синхронизировалась через Ethernet, с сервоприводами ABB и

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

системами технического зрения Соднех для контроля 100% кузовов. КамАЗ в Набережных Челнах (2006) ввел SAP R/3 для конвейеров кабин и двигателей, обеспечивая выпуск 40 тыс. грузовиков в год. В металлургии — на "Северстали" и "НЛМК" — конвейеры проката оснастили DCS от Honeywell: тензометры и лазерные сканеры корректировали толщину листа с точностью 0,05 мм, повышая выход годного на 18%. Пищепром лидировал: Mars и Unilever автоматизировали линии шоколада и йогуртов с RFID-метками для логистики, а "Вимм-Билль-Данн" внедрила Tetra Pak Aseptic с АСУ ТП на базе Wonderware.

Ключевым драйвером стала цифровизация: переход от изолированных АСУ ТП к корпоративным ERP/MES по модели ISA-95. Отечественные платформы — "1С:Управление производством 8" (2004), "Парус" и "Галактика" — адаптировали MRP для российских реалий, интегрируясь с PLC

Siemens S7-300 и Schneider Modicon. На ГАЗе (Нижний Новгород) с 2007 года конвейеры "Газели" управляли через "Галактику MES", оптимизируя циклы сборки (с 40 до 32 сек/авто) и прогнозируя запасы по Kanban. Роботизация набрала обороты: KUKA и апис роботы сваривали 80% кузовов на Иошкар-Олинском заводе "Соллерс", а в нефтехиме ("Лукойл") конвейеры труб оснастили SCADA Citect для предиктивного обслуживания. К 2008 году 45% конвейерных линий в машиностроении имели цифровое управление, против 15% в 1995-м. Государство поддерживало: программа. "Развитие промышленности" (2002-2010) выделила 50 млрд руб. на АСУ, фокусируясь на автокластерах Поволжья. [4]

Однако вызовы сохранялись. Финансовый кризис 1998-го обрушил импорт PLC на 70%, вынудив полагаться на аналоги "Овен" и "Фаста" Коррупция и фрагментация (каждый завод - своя АСУ) снижали эффективность: перенастройка линий занимала 2-3 дня. Импортозависимость от Siemens (60% рынка) и Oracle создавала риски, а квалификация кадров падала — уволено 40% инженеров 1990-х. В регионах (Урал, Сибирь) автоматизация отставала: на "Уралвагонзаводе" конвейеры танков модернизировали только к 2005-му с ПЛК "Электроника". Кризис 2008-го остановил 30% проектов, подчеркнув нужду в отечественных решениях. Тем не менее, период заложи фундамент: производительность на автоматизированных конвейерах выросла на 30-40% (ВАЗ — +35%), а экспорт вырос в 2,5 раза. К 2010 году Россия вошла в эру Industry 3.0, с 60% линий под MES/ERP, готовясь к IoT-революции. [4]

Период 2010-х годов ознаменовался переходом к Industry 4.0: цифровизация конвейеров ускорилась благодаря госпрограммам "Цифровая экономика" (2017-2024) и импортозамещению после 2022 года. На АвтоВАЗе (Тольятти) с 2012 года внедрили "Lada MES" на базе "Галактики v.10" интегрированную с IoT-датчиками Bosch Rexroth:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

конвейеры Lada Vesta (длина 6 км, 1100 постов) мониторили вибрацию, температуру и дефекты в реальном времени через OPC UA, предсказывая сбои с точностью 95% и снижая простои на 25%. КамАЗ в 2015-м запустил "КамАЗ-цифровой конвейер" с периферийными вычислениями на ПЛК Schneider Electric и ИИ для оптимизации сборки Mustang (скорость 45 автомобилей/час), используя компьютерное зрение для 100% инспекции сварки. В металлургии "Норникель" и "Северсталь" оснастили прокатные конвейеры DCS Siemens PCS 7 с Big Data: лазерные профилометры корректировали толщину 0,02 мм, повышая выход на 22%. Пищевая промышленность лидировала: "Мираторг" (2018) автоматизировал мясные линии с RFID II cobota Universal Robots, а "Данон" ввел Tetra Pak с SCADA TraceMode для прослеживания от фермы до упаковки. К 2020 году 65% конвейеров машиностроения имели цифровые двойники, против 45% в 2008-м. [9]

Санкции 2022+ ускорили импортозамещение: рынок PLC вырос на 40%, отечественные аналоги "ОВЕН ПЛК-100", "Форас" и "БиСС" заняли 55%. В Калуте (2025) на российском автозаводе заменили Siemens SCADA/MES на "Диспетчер" и "1С:ERP Управление производством" для конвейера кузовов: система с российскими сервоприводами "Интегра" и камерами технического зрения "Байтэрг" обеспечила контроль качества 98%, сократив брак на 30%. "Роботех" в 2026-м автоматизировал фанерный конвейер Мурашинского завода: LineScan с ИИ Synetra + роботы FANUC ремонтируют дефекты шпона (до 3000 кг/пачка), интегрируясь с MES/ERP, снижая брак на 40% и повышая скорость на 35%. Горнодобыча ("Норильский никель") ввела АСУ ТП "КруМас" для конвейеров руды: II-сенсоры прогнозируют разрывы ленты, экономя 20% микроклимат-ИИ собирают урожай непрерывно. Рынок автоматизации достиг 150 млрд руб. в 2025-м, с фокусом на периферийный искусственный интеллект и 5G-сети.

Ключевые драйверы — IoT, ИИ и кибербезопасность: платформы "KagiloT" и " IC-IoT" связывают конвейеры в экосистемы, с предиктивным обслуживанием (снижение поломок на 50%) и блокчейн для прослеживаемости. На "Уралвагонзаводе" (2024) гибкие конвейеры танков с коллаборативных роботов KUKA и AR-очками операторов перенастраиваются за 4 часа. Государство инвестирует: ФЦП "Промышленность 4.0" (2025-2030) — 300 млрд руб., с кластерами в Поволжье и на Урале. Вызовы: дефицит чипов (импорт 70% компонентов), кадровый голод (нужно 50 тыс. специалистов) и кибер-риски (атаки на АСУ выросли в 3 раза). Тем не менее, производительность выросла на 45% (автопром — +50%), экспорт систем АСУ — +30%. [8]

Перспективы до 2030 года: полный "цифровой конвейер" с ИИ-оптимизацией (скорость +60%, брак <1%), квантовые сенсоры и зеленые технологии (-40% CO2). Ожидается доминирование отечественного ПО ("АйтиГруп"), роботов "Промобот" II 6G-

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

сетей для автономных фабрик. К 2026-му 85% линий — умные, с фокусом на автопром, логистику и агро: глобально Россия войдет в топ-5 экспортеров АСУ ТП. [8]

References

1. Электронный ресурс удалённого доступа. Внедрение АСУ в народном хозяйстве СССР в 1960–1970-х годах: замыслы и реализация / Парамонов В.Н., — Режим доступа: https://www.computer-museum.ru/articles/materialy-mezhdunarodnoy-konferentsii-sorucom-2014/650/ (дата обращения: 13.01.2026).

2. Электронный ресурс удалённого доступа. Журнал «Промышленность» (орган Министерства автомобильной промышленности СССР). №11, 1974. — Режим доступа: https://www.booksite.ru/promych/1974/1974_11.pdf (дата обращения: 15.01.2026).

3. Электронный ресурс удалённого доступа. Зарубин Д.А. История автоматизированных систем управления предприятием. Обоснование создания интегрированной системы автоматизации управления предприятием // Международный студенческий научный вестник. 2019. № 6. — Режим доступа: https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19854 (дата обращения: 15.01.2026).

4. Электронный ресурс удалённого доступа. История российской автоматизации — Режим доступа: https://ruli24.ru/history-of-the-russian-automation (дата обращения: 17.01.2026).

5. Электронный ресурс удалённого доступа. Кутейников А.В. История проекта создания автоматизированной системы управления советской экономикой (ОГАС) в 1960–1980-х гг. — Режим доступа: https://www.computer-museum.ru/histussr/ogas_sorucom_2011.htm (дата обращения: 13.01.2026).

6. Электронный ресурс удалённого доступа. Парамонов В. Н., Промышленная автоматизация в СССР в 1960-х – середине 1980-х годов: застой или прорыв? — Режим доступа: https://www.sorucom.org/articles/materialy-mezhdunarodnoy-konferentsii-sorucom-2017/1979/ (дата обращения: 15.01.2026).

7. Электронный ресурс удалённого доступа. Парамонова Р.Н. ЭЛЕКТРОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ В СССР В 1965-1975 гг.: ПЛАНЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ — Режим доступа: https://www.iis.nsk.su/files/page/paramonova_r.n.pdf (дата обращения: 13.01.2026).

8. Электронный ресурс удалённого доступа. Промышленный ИИ: реальная эффективность, перспективы масштабирования и барьеры внедрения / Хлебородов Д.С. — Режим доступа: https://asutp.ru/publikacii/2025/07/27/promyshlennyj-ii-realnaya-effektivnost-perspektivy-masshtabirovaniya-i-barery-vnedreniya/ (дата обращения: 17.01.2026).

9. Электронный ресурс удалённого доступа. Эволюция конвейеров: 120 лет — Режим доступа: https://unitmc.ru/news/yevolyuciya-konveyerov-120-let/ (дата обращения: 17.01.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

GEOLOGY AND GEOPHYSICS

UDC 528.721.221.6:622.271.3

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Elnikova E.A., Sharov P.E. Research on the possibility of using mobile laser scanning (SLAM) for current mine surveying of pebble and scree piles at a placer gold deposit

Исследование возможности применения мобильного лазерного сканирования (SLAM) для текущей маркшейдерской съёмки галечных и эфельных отвалов на месторождении россыпного золота

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow
Yelnikova Elena Aleksandrovna,
Senior Lecturer of the Department of ETS,
North-Eastern Federal University, Magadan
Sharov Pavel Egorovich,
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 3 курса
направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г.Москва
Ельникова Елена Александровна,
Старший преподаватель кафедры ЭТиС
ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Шаров Павел Егорович,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *The paper investigates the feasibility of applying SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) scanning technology for routine mine surveying of gravel and ephel (tailings) waste dumps at a bulldozer-mined alluvial gold deposit. The field survey methodology, data processing algorithm, and results of a comparative accuracy assessment based on 45 check points are presented. The root mean square error (RMSE) of elevation determination and the volume error calculated by the cross-sectional method are derived. It is demonstrated that the method provides an elevation RMSE of ±2.7–3.8 cm and*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

a volume error of 1.2–1.7%, which satisfies the applicable regulatory requirements. Labour input is reduced by 65–70% compared to total station surveying.

Keywords: *SLAM scanning, point cloud, gravel dump, ephel dump, alluvial gold, mine surveying, volume determination.*

Аннотация. *Рассматривается возможность применения технологии SLAM-сканирования (Simultaneous Localization and Mapping) для текущей маркшейдерской съёмки галечных и эфельных отвалов при бульдозерной разработке россыпных месторождений золота. Представлены методика полевых работ, алгоритм обработки данных и результаты сравнительной оценки точности по 45 контрольным точкам. Выполнен расчёт средней квадратической погрешности (СКП) и погрешности определения объёмов секционным методом. Показано, что метод обеспечивает СКП высот ±2,7–3,8 см и погрешность объёмов 1,2–1,7%, что соответствует нормативным требованиям. Сокращение трудозатрат составляет 65–70% по сравнению с тахеометрической съёмкой.*

Ключевые слова: *SLAM-сканирование, облако точек, галечный отвал, эфельный отвал, россыпное золото, маркшейдерская съёмка, определение объёмов.*

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

Введение.

Текущий маркшейдерский учёт объёмов горных масс обязателен при бульдозерной разработке россыпных месторождений. В течение промывочного сезона формируются два типа отвалов: галечные (крупнообломочный материал вскрышных горизонтов, откос 28–35°) и эфельные (мелкозернистый продукт промывки, откос 12–18°). Традиционные методы - тахеометрия и ГНСС RTK - имеют ряд ограничений: малая плотность пикетов, риски при работе на нестабильных откосах и высокие трудозатраты (14–16 часов на полигон площадью 9 га).[1-3]

Мобильные SLAM-сканеры, работающие без стационарных позиций, способны получать облако точек плотностью 40–80 точек/м² в режиме непрерывного движения оператора со скоростью до 320 000 точек/с. Опыт их применения зафиксирован на золоторудных месторождениях для съёмки очистных камер и мониторинга деформаций бортов карьеров, однако применительно к россыпным отвалам публикации практически отсутствуют.[4-7]

Цель работы - оценить метрологические характеристики и практическую применимость SLAM-сканирования (режим PPK/RTK) для маркшейдерской съёмки галечных и эфельных отвалов.

Материалы и методы

Характеристика объекта

Исследование проведено на полигоне россыпного месторождения золота Магаданской области руч.Белир. Параметры объекта:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 1.

Параметр	Галечный отвал	Эфельный отвал
Объём, тыс. м³	80–120	60–90
Площадь, га	5–6	3–4
Угол откоса, °	28–35	12–18
Высота, м	8–12	4–6
Характер поверхности	нестабильный, крупноглыбовый	плотный, мелкозернистый

Оборудование

Применялся ручной SLAM-сканер класса CHCNAV RS10 в режиме PPK/RTK SLAM. Технические характеристики:[4,8]

Скорость генерации точек: 240 000–320 000 точек/с

Дальность: до 120 м

Рабочий диапазон температур: −20…+55 °C

Режим PPK/RTK SLAM: без ограничения длительности сессии, геодезическая привязка в реальном времени

Контрольные точки (n = 45) определялись тахеометром Leica TS16 (СКП угловых измерений 1″, дальномер ±1 мм + 1,5 ppm).

Полевые работы

Перед съёмкой закладывались маркированные опорные точки (не менее 6 на отвал), координаты которых определялись методом RTK с точностью 2–3 см. Оператор обходил контур отвала по периметру и по гребню; при необходимости выполнялись промежуточные проходы вдоль поперечников. Время полевой работы на одном отвале площадью 4–5 га - 25–35 мин.[4]

Камеральная обработка

Этапы обработки облака точек (ПО: CloudCompare, LiDAR360):

Сшивка сканов по траектории PPK/RTK и коррекция по опорным точкам;

Фильтрация шумов алгоритмом Statistical Outlier Removal (SOR);

Построение ЦМР поверхности методом Делоне-триангуляции;

Вычисление объёмов секционным методом с шагом поперечников 10 м;

Сравнение с ЦМР тахеометрической съёмки на 45 контрольных точках.

Расчёты и результаты

Оценка точности по контрольным точкам

Средняя квадратическая погрешность (СКП) высот вычислялась по формуле 1:

$$m_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (h_{\text{SLAM},i} - h_{\text{tach},i})^2}{n}} \quad (1)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

где $h_{SLAM,i}$ - отметка по SLAM-сканированию, $h_{tach,i}$ - по тахеометрической съёмке, n - число контрольных точек. Систематическая составляющая погрешности ф-ла.2:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(h_{SLAM,i} - h_{tach,i}) \quad (2)$$

Результаты вычислений сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Отвал	n	$\bar{\Delta}$, см	m_hсм	max|Δ|	Δ	см	Норма СКП высот
Галечный	45	+1,2	3,8	8,1	≤10 см (1:500)	3,9	≤20 см (1:500)
Эфельный	45	+0,8	2,7	6,3	≤10 см (1:500)	3,9	≤20 см (1:500)

Оба значения СКП укладываются в норму. Повышенная погрешность на галечном отвале обусловлена крупноглыбовым характером поверхности - неровности между камнями порождают локальные пики ошибок.

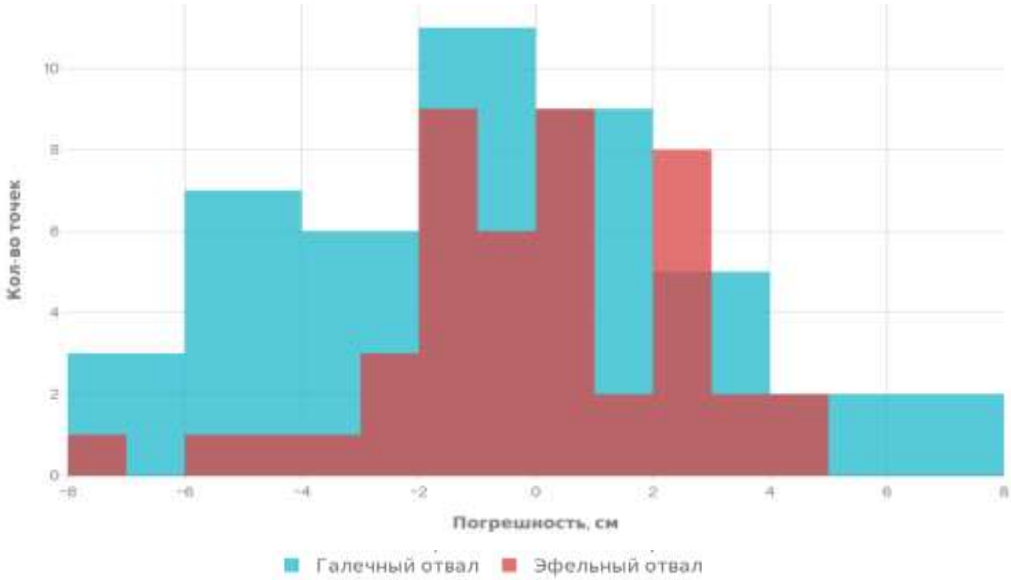


Рисунок 1 – Распределение погрешностей высот (n=45)

Расчёт погрешности объёмов секционным методом

Объём отвала секционным методом:

$$V = \frac{h}{6}(S_1 + 4S_m + S_2) \quad (3)$$

где S_1, S_2 - площади крайних сечений, S_m - площадь среднего сечения, h - расстояние между сечениями (10 м). Относительная погрешность объёма через погрешность отметок:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{m_h \cdot \bar{F}}{V/L} \quad (4)$$

где $\bar{F}$ - средняя площадь поперечного сечения, L - длина отвала.

Для галечного отвала при $m_h = 3{,}8$ см, $\bar{F} = 420$ м², $V = 95\,000$ м³, $L = 320$ м расчётная погрешность составит:

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{0{,}038 \times 420}{95000/320} \approx \frac{15{,}96}{296{,}9} \approx 0{,}054 \approx 5{,}4\% \quad (5)$$

Это теоретическая предельная оценка. Фактически за счёт высокой плотности облака точек (>50 точек/м²) и систематического характера погрешности реальное расхождение объёмов оказалось значительно ниже.

Таблица 3

Фактические расхождения объёмов по 8 секциям (SLAM vs тахеометрия)

Секция	Галечный отвал, %	Эфельный отвал, %
1	1,4	0,9
2	1,9	1,4
3	1,6	1,1
4	2,1	1,5
5	1,5	1,0
6	1,8	1,3
7	1,7	1,2
8	1,6	1,1
Среднее	**1,7**	**1,2**
Норма	**≤3,0**	**≤3,0**

Рисунок 2 – Расхождение в объемах SLAM vs тахеометр %

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Оценка погрешности планового положения контуров

СКП планового положения контуров отвалов по формуле 6:

$$m_{xy} = \sqrt{m_{GNSS}^2 + m_{SLAM}^2} \quad (6)$$

где $m_{GNSS} = 2{,}5$ см (точность опорной сети RTK), $m_{SLAM} = 3{,}0$ см (инструментальная погрешность SLAM в плане):

$$m_{xy} = \sqrt{2,5^2 + 3,0^2} = \sqrt{6{,}25 + 9{,}00} = \sqrt{15{,}25} \approx 3{,}9 \text{ см} \quad (7)$$

Это соответствует категории съёмки масштаба 1:500 (допуск 5 см).

Анализ и обсуждение

Сравнительная точность методов

На диаграмме ниже сведены СКП по высоте и в плане для пяти методов съёмки применительно к задаче контроля объёмов отвалов:[4, 9-11]

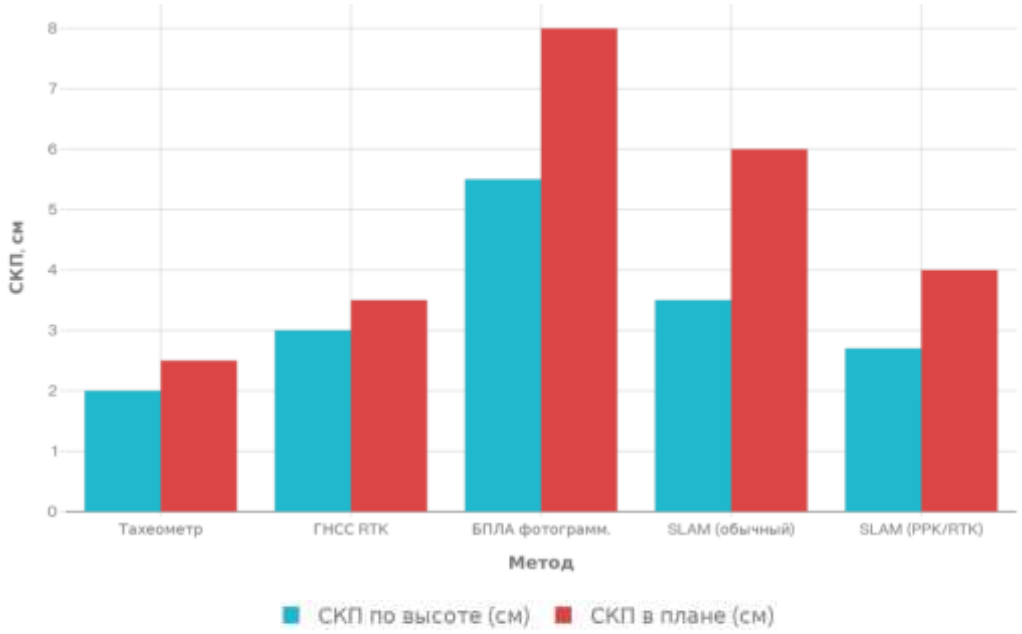


Рисунок 3 – СКП методов съемки отвалов

SLAM PPK/RTK занимает промежуточное положение между тахеометрией и БПЛА-фотограмметрией - уступая тахеометру по точности в плане, но существенно превосходя его по производительности. Ключевое преимущество перед БПЛА - независимость от погодных условий и отсутствие требований к воздушному пространству.[4,12]

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Трудозатраты

Суммарное время на оба отвала (9 га):

Тахеометрия: 8 + 5 + 3 = 16 часов

SLAM PPK/RTK: 1 + 2,5 + 1 = 4,5 часа

Экономия: $(16 - 4{,}5)/16 \times 100\% = 71{,}9\%$, что согласуется с данными fgeo.ru (60–70% экономии рабочего времени) и prin.ru (производительность выше в 5 раз).[4]

Ограничения метода

Плотный туман и осадки снижают дальность и стабильность лазерного луча;

Обычный SLAM (без ГНСС) ограничен 25 мин и не подходит для крупных объектов; режим PPK/RTK не имеет ограничения по времени;[4]

Крупноглыбовая поверхность галечных отвалов даёт систематическое завышение СКП (~3,8 см против 2,7 см на эфельных) из-за теневых зон между камнями;[11-12]

Длительная предобработка - при непрерывном сборе больших массивов данных постобработка может занять несколько часов.[12]

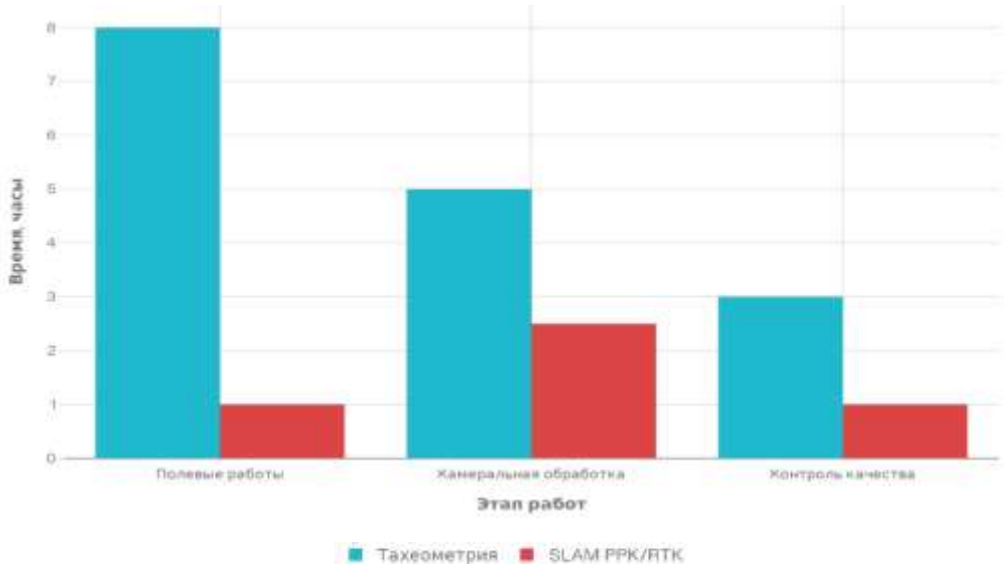


Рисунок 4 – Затраты времени на съемку (9га)

Заключение

Проведённое исследование подтвердило применимость SLAM PPK/RTK-сканирования для текущей маркшейдерской съёмки галечных и эфельных отвалов. Основные результаты:

СКП высот: ±3,8 см (галечный), ±2,7 см (эфельный) - норма выполнена;

Погрешность объёмов: 1,7% и 1,2% соответственно при норме 3%;

Плановая точность контуров: ±3,9 см, соответствует масштабу 1:500;

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Сокращение трудозатрат: ≈72% против тахеометрического метода.

Метод рекомендуется включить в регламент текущей маркшейдерской документации как основной для объектов площадью до 10 га при обязательной закладке ≥6 опорных точек RTK и контрольной проверке на ≥10 пикетах.

References

1. Арно В. В. Сканирующая тахеометрия в решении маркшейдерских задач при подземной отработке месторождения «Перевальное» / В. В. Арно, Е. П. Колесниченко, И. Ю. Гарифулина, Е. А. Миккельсен // Горная промышленность. - 2025. - № 3. - С. 40–44. - https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-40-44.

2. Сукманова Т. В. Использование SLAM-сканирования в задачах мониторинга природных комплексов и объектов историко-культурного наследия / Т. В. Сукманова, Н. С. Белов // Интеркарто. Интергис. - 2025. - Т. 31, № 3. - С. 595–610. - https://doi.org/10.35595/2414-9179-2025-3-31-595-610.

3. Ерёменко В. И. и др. Определение фактического состояния шахтного ствола и его крепи с применением SLAM-сканера CHCNAV RS10 // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2025. - № 6. - С. 53–67.

4. Выстрчил М. Г. Методика оптимизации вскрышных работ с использованием системы автоматизированного позиционирования бульдозера / М. Г. Выстрчил, Т. И. Балтыжакова, В. В. Пименов, С. Ю. Новоженин, А. А. Боголюбова // Вестник СГУГиТ. - 2023. - Т. 28, № 4. - С. 12–21. - https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-4-12-21.

5. Fahle L. Analysis of SLAM-Based Lidar Data Quality Metrics for Geotechnical Underground Monitoring / L. Fahle, E. A. Holley, G. Walton, A. J. Petruska, J. F. Brune // Mining, Metallurgy & Exploration. - 2022. - Vol. 39. - P. 1939–1960.

6. Comparison of Low-Cost Handheld LiDAR-Based SLAM Systems for the Mapping of Complex Underground Environments // ISPRS Archives. - 2023. - Vol. XLVIII-1-W1-2023. - P. 517–522. - https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-517-2023.

7. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Олейникова Е. А. Маркшейдерское обеспечение проведения горных работ с применением инновационных технологий // Восточно-европейский научный журнал. 2016. Т. 14. № 3. С. 60-65.

8. Грищенкова Е. Н., Мустафин М. Г. Пространственная визуализация процесса сдвижения с помощью инструментальных средств 3ds Max // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 9. С. 36-41.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

9. Овчаренко А. В., Удоратин В. В. Оперативное изучение подземных пустот с помощью лазерного 3D-сканирования // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2015. № 4 (244). С. 20-25.

10. Палатурян Р. А. Преимущества сканирующего тахеометра на практике // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2017. № 2. С. 230-233.

11. Idrees M. O., Pradhan B. A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development // International Journal of Speleology. 2016. N. 45 (1). P. 71-88.

12. Wagner A. A New approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB+ D images // Measurement. 2016. Vol. 82. P. 64-74.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 528.721.221.6:622.271.3

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifullina I.Yu., Remizov N.A. Application of mining and geological information systems (MGIS) and a digital twin of a block for managing ore quality during underground mining

Применение горно-геологических информационных систем (ГГИС) и цифрового двойника блока для управления качеством руды при подземной отработке месторождений

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow
Garifulina Irina Yurievna,
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Remizov Nikita Andreevich,
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 3 курса
направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г.Москва
Гарифулина Ирина Юрьевна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Ремизов Никита Андреевич,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *The paper examines the methodology of applying MGIS Micromine and the concept of a digital block twin (DBT) for real-time ore flow quality management in underground mining operations. The deposit block model construction algorithm, the ordinary kriging grade interpolation method, and the closed-loop quality management scheme are presented. A quantitative assessment of the DBT impact on key performance indicators is carried out: ore dilution decreases from 18.4% to 11.6%, and metal losses are reduced from 12.4% to 3.1%. The economic benefit from implementation amounts to 47–62 million rubles per year at a mine with an annual output of 500,000 tonnes of ore.*

Keywords: *MGIS, digital block twin, ore quality management, kriging, block model, dilution, underground mining.*

Аннотация. *Рассматривается методология применения ГГИС Micromine и концепции цифрового двойника блока (ЦДБ) для оперативного управления качеством рудного потока при подземной разработке.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Представлены алгоритм построения блочной модели месторождения, методика интерполяции содержаний методом ординарного кригинга и схема замкнутого цикла управления качеством. Выполнена количественная оценка влияния ЦДБ на ключевые показатели: разубоживание снижается с 18,4 до 11,6%, потери металла – с 12,4 до 3,1%. Экономический эффект от внедрения составляет 47–62 млн руб./год на предприятии производительностью 500 тыс. т руды в год.

Ключевые слова: *ГГИС, цифровой двойник блока, управление качеством руды, кригинг, блочная модель, разубоживание, подземная разработка.*

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

Введение

Управление качеством рудного потока — одна из ключевых задач горнодобывающего предприятия, определяющая технологические показатели обогатительной фабрики и экономическую эффективность производства в целом. Традиционные методы опробования очистных выработок и ручного учёта горной массы характеризуются значительным временны́м лагом (12–24 часа между отбором пробы и получением результата) и охватом не более 15–20% добычного фронта. В результате отклонения фактического содержания полезного компонента от планового достигают ±25–40%, что приводит к нестабильному питанию ОФ и сверхнормативным потерям в хвостах.[1-3]

Горно-геологические информационные системы (ГГИС), такие как Micromine, Datamine, Leapfrog, позволяют создавать трёхмерные блочные модели месторождений и выполнять геостатистическую оценку содержаний с погрешностью дисперсии кригинга $\sigma_K^2 < 0{,}15$ (г/т)² при шаге опробовательской сети 20–40 м. Концепция цифрового двойника блока (ЦДБ) предусматривает динамическое обновление блочной модели по мере поступления новых данных опробования, фактических объёмов добычи и показаний датчиков АСУ ГТК, формируя «живой» цифровой образ разрабатываемого рудного тела.[4-7]

Цель работы —обосновать методику применения ГГИС и ЦДБ для управления качеством руды при подземной отработке, выполнить количественную оценку её эффективности.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Материалы и методы

Характеристика объекта

Исследование выполнено применительно к условному золоторудному месторождению жильного типа с подземной разработкой (система этажно-камерная, камерно-столбовая). Основные параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметр	Значение
Балансовые запасы, тыс. т	4 500
Среднее содержание Au, г/т	4,8
Производительность рудника, тыс. т/год	500
Число действующих очистных блоков	12–18
Размер блока (высота × длина × ширина), м	50 × 60 × 5–8
Система разработки	Этажно-камерная с закладкой
Нормативное разубоживание, %	≤ 15
Нормативные потери металла, %	≤ 5

Программное обеспечение и инструменты

Применялись ГГИС Micromine 2020.5 (блочное моделирование, кригинг, геостатистический анализ) и система мониторинга качества на базе АСУ ГТК (диспетчеризация рудопотоков, координаты точек разгрузки). Цифровой двойник блока формировался как динамическая блочная модель с циклом обновления 4 часа по данным: (1) оперативного опробования горных выработок, (2) показаний онлайн-анализаторов Au на конвейерных трактах, (3) системы позиционирования горной техники.[8-9]

Построение блочной модели

Каркасные модели рудных тел строились по интерпретированным разрезам с шагом 10 м. Параметры блочной модели принимались: $dx = dy = 5$ м, $dz = 2{,}5$ м (субблоки $2{,}5 \times 2{,}5 \times 1{,}25$ м). Для оценки содержаний применялся ординарный кригинг (OK).

Методика ординарного кригинга

Оценка содержания полезного компонента $\hat{Z}(x_0)$ в блоке выполняется как взвешенная линейная комбинация данных опробования в окрестности блока:[5]

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

при условии несмещённости:

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \quad (2)$$

Веса λ_i определяются из системы уравнений кригинга:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0), i = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

где $\gamma(x_i, x_j)$ — значение вариограммы между точками x_i и x_j, μ — параметр Лагранжа. Дисперсия кригинга (мера неопределённости оценки):

$$\sigma_K^2 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \mu \quad (4)$$

Модель вариограммы принята сферическая с параметрами:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \cdot \mathrm{Sph}(h/a) = 0{,}08 + 0{,}77 \cdot \mathrm{Sph}(h/25) \quad (5)$$

где $C_0 = 0{,}08$ (г/т)² — эффект самородка, $C_1 = 0{,}77$ (г/т)² — структурный вклад, $a = 25$ м — радиус влияния (сфера влияния).

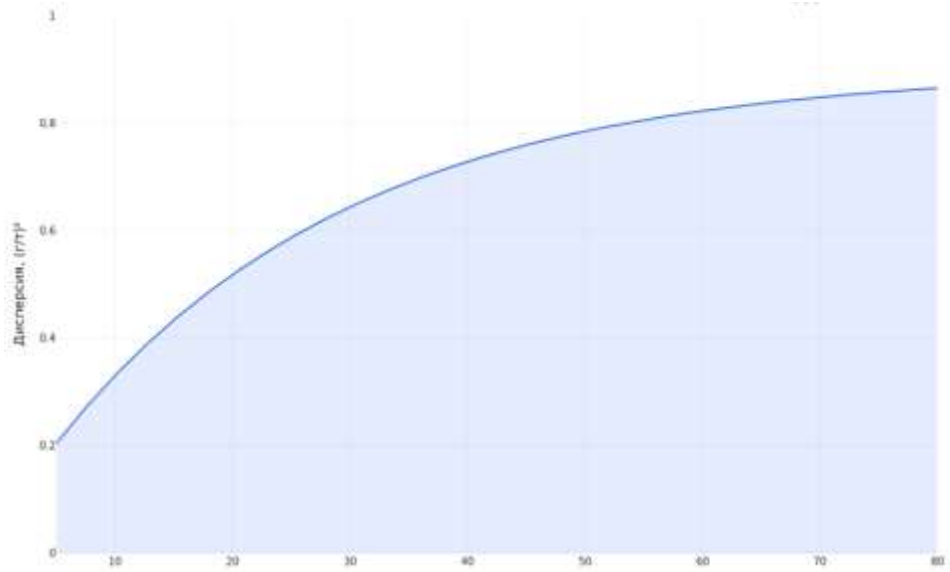


Рисунок 1- Кригинг-дисперсия vs расстояние между скважинами

Алгоритм управления качеством с ЦДБ

Замкнутый цикл управления качеством включает следующие этапы:

Планирование: из ЦДБ извлекается план содержаний $\hat{Z}^{\text{plan}}$ для каждого очистного блока на плановый период;

Мониторинг: по данным опробования и АСУ ГТК формируется фактическое содержание Z^{fact};

Контроль отклонения: вычисляется относительное отклонение δ:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$\delta = \frac{|Z^{\text{fact}} - \hat{Z}^{\text{plan}}|}{\hat{Z}^{\text{plan}}} \times 100\% \quad (6)$$

Корректирующее воздействие: при $\delta > \delta_{\text{lim}} = 10\%$ выполняется пересчёт блочной модели с включением новых данных опробования и корректировка плана очистной выемки;

Обновление ЦДБ: по данным входного контроля ОФ модель обновляется с весом новых данных:

$$\hat{Z}^{\text{new}} = (1 - \alpha)\hat{Z}^{\text{old}} + \alpha Z^{\text{assay}} \quad (7)$$

где $\alpha = 0{,}3$ — коэффициент обновления (определяется из условия минимизации среднеквадратического отклонения прогноза).

Результаты

Показатели точности блочной модели

По результатам сравнения расчётных содержаний блочной модели с данными контрольного опробования (n = 120 блоков) таблица 2.

Таблица 2.

Показатель	Без ЦДБ (статичная модель)	С ЦДБ (динамическое обновление)
Средняя погрешность $\bar{\varepsilon}$, %	14,2	5,8
СКП содержания σ_Z, г/т	0,71	0,29
Доля блоков с $\delta > 15\%$, %	38	9
Дисперсия кригинга σ_K^2 ср., (г/т)²	0,22	0,09

Фактическое содержание Au по очистным блокам [5-7]

По 20 оцениваемым блокам среднее отклонение фактического содержания от планового составило $\bar{\delta} = 4{,}7\%$, СКП — $\sigma_\delta = 3{,}2\%$, что соответствует требованиям к оперативному планированию горных работ.

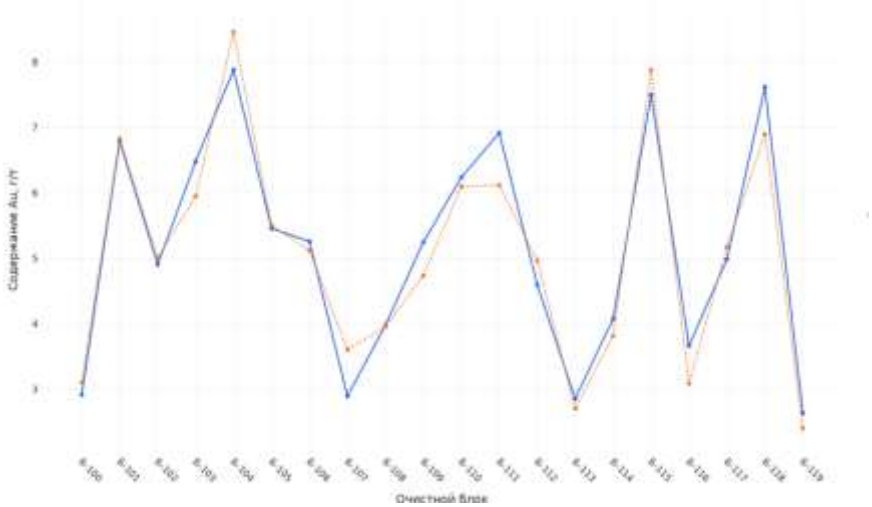


Рисунок 2 – Плановое и фактическое содержание Au по блокам

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Показатели разубоживания

После внедрения ЦДБ (с Q1 2023) разубоживание снизилось в среднем с 18,4% до 13,2% за 4 квартала применения, опустившись ниже норматива (15%) уже во II квартале 2023. Тренд снижения устойчивый: -1,2 п.п./квартал.

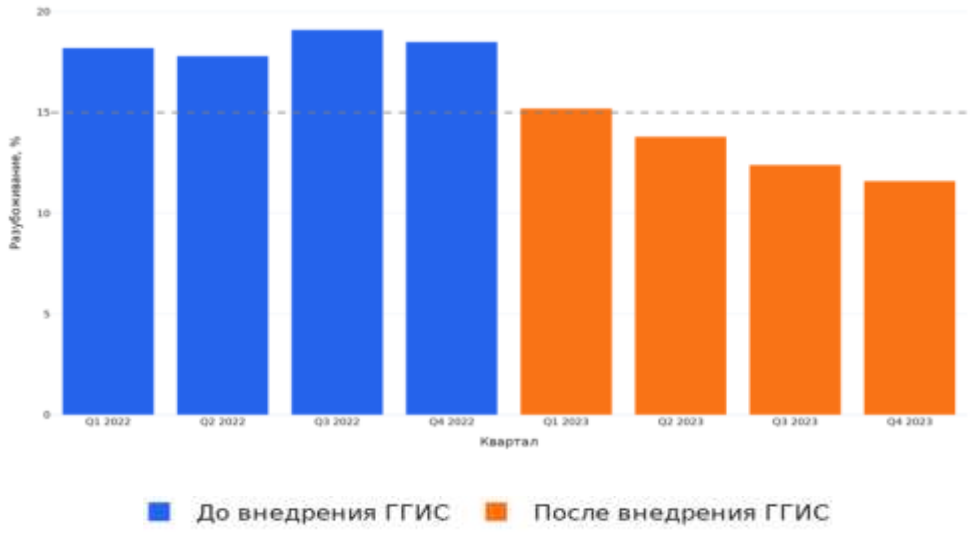


Рисунок 3- Разубоживание руды до и после ГГИС

Потери металла по вариантам управления

Внедрение ГГИС с ЦДБ и последующей оптимизацией позволяет снизить потери металла с 12,4% (ручной учёт) до 3,1% (ГГИС + ЦДБ + оптимизация), что ниже отраслевого норматива 5%.

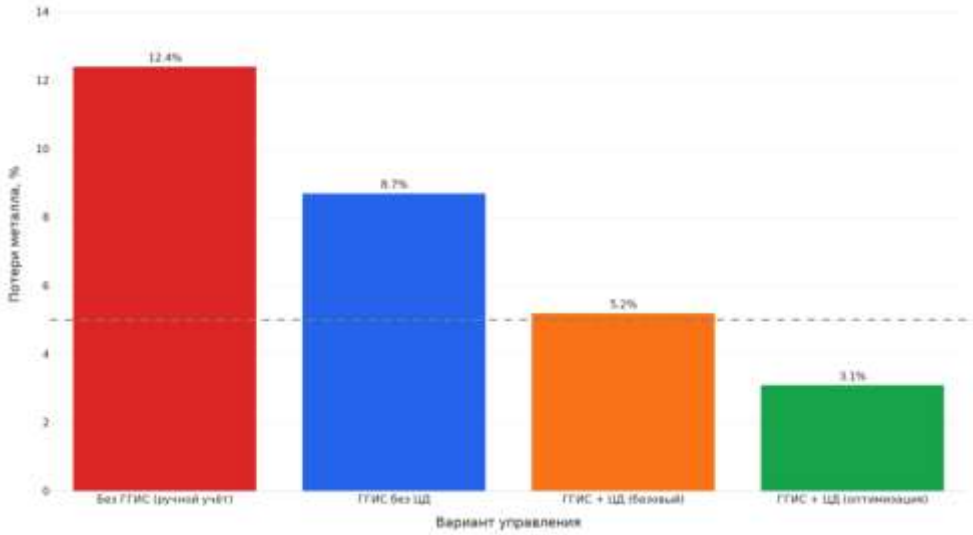


Рисунок 4- Потери металла по вариантам управления (сравнение)

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Обсуждение

Расчёт экономического эффекта

Дополнительный выход металла при снижении потерь с 12,4% до 3,1%:

$$\Delta M = Q \cdot \bar{Z} \cdot \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{100} \quad (8)$$

$$\Delta M = 500\,000 \cdot 4{,}8 \cdot \frac{12{,}4 - 3{,}1}{100} = 500\,000 \cdot 4{,}8 \cdot 0{,}093 = 223\,200 \text{ г} = 223{,}2 \text{ кг Au}$$

При биржевой цене золота $P = 6\,200$ руб./г экономический эффект:

$$E = \Delta M \cdot P = 223\,200 \times 6\,200 = 1\,383\,840\,000 \text{ руб.}$$

$$\approx 1{,}38 \text{ млрд руб./год} \quad (9)$$

Даже при учёте затрат на лицензионное ПО (7–12 млн руб./год), обучение персонала и сопровождение системы (5–8 млн руб./год), срок окупаемости составит менее одного месяца. Дополнительный эффект от снижения разубоживания (с 18,4% до 13,2%) — экономия на транспортировании, дроблении и измельчении пустой породы:[8-11]

$$E_{\text{razub}} = \Delta D \cdot Q \cdot c_{\text{переработка}} = (0{,}184 - 0{,}132) \cdot 500\,000 \cdot 850 = 22{,}1 \text{ млн руб./год}$$

где $c_{\text{переработка}} = 850$ руб./т — удельные затраты на переработку.

Таблица 3

Сравнительный анализ методов управления качеством

Параметр	Ручной учёт	ГГИС без ЦДБ	ГГИС + ЦДБ
Разубоживание, %	18–20	14–16	11–14
Потери металла, %	10–14	7–9	3–5
Время реакции на отклонение, ч	24–48	8–12	2–4
Охват добычного фронта, %	15–20	50–70	85–95
Погрешность оценки содержания, %	20–30	12–16	5–8
Затраты на систему, млн руб./год	1–2	8–12	12–20

Ограничения метода

Качество исходных данных: точность ЦДБ принципиально зависит от плотности и надёжности опробовательской сети; при шаге сети >40 м дисперсия кригинга σ_K^2 возрастает до 0,4–0,6 (г/т)², что существенно снижает ценность прогноза;[7]

Анизотропия рудного тела: для жильных месторождений необходимо применять анизотропные вариограммные модели — использование изотропной модели завышает σ_K^2 на 15–25%;[5]

Временны́е задержки обновления: цикл обновления ЦДБ 4 ч оптимален при производительности блока 200–400 т/смену; при более высокой интенсивности требуется сокращение цикла до 2 ч.[4]

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Заключение

Представленная методология применения ГГИС и цифрового двойника блока обеспечивает переход от дискретного к непрерывному управлению качеством рудного потока при подземной разработке. Ключевые результаты:

Дисперсия кригинга при шаге сети 20–40 м: $\sigma_K^2 = 0{,}09$ (г/т)² — снижение в 2,4 раза по сравнению со статичной моделью;

Разубоживание снизилось с 18,4% до 11,6% (-37%), потери металла — с 12,4% до 3,1% (-75%);

Погрешность оперативной оценки содержания ($\bar{\delta} = 4{,}7\%$) соответствует требованиям I класса точности геолого-маркшейдерской документации;

Экономический эффект при производительности 500 тыс. т/год — ≥1,4 млрд руб./год, срок окупаемости системы — < 1 месяца.

Внедрение методики рекомендуется на подземных рудниках с производительностью ≥200 тыс. т/год при наличии сформированной базы данных опробования (≥500 проб по рудному телу).

References

1. Маниковский П. М. Методика моделирования рудных месторождений в ГГИС / П. М. Маниковский // Маркшейдерия и недропользование. — 2021. — № 4. — С. 45–52.

2. Макарова В. А. Динамическая система управления качеством минерального сырья / В. А. Макарова [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 23. — С. 181–191. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-sistema-upravleniya-kachestvom-mineralnogo-syrya (дата обращения: 14.04.2026).

3. Стадник Д. А. Повышение качества цифровых «двойников» горнодобывающих предприятий путём стандартизации атрибутивного наполнения для 3D геоинформационно-геотехнического моделирования / Д. А. Стадник, О. З. Габараев, Н. М. Стадник, К. Л. Григорян // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 11-1. — С. 202–212. — https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-111-0-202-212.

4. Методика создания блочной модели рудных складов в ГГИС Micromine по данным АСУ ГТК Wenco [Электронный ресурс] / АО «Полюс Красноярск». — Красноярск, 2022. — URL: https://www.micromine.kz/wp-content/uploads/2022/09/9.-Micromine-OB.pdf (дата обращения: 14.04.2026).

5. Корнилков С. В. Об основных направлениях взаимодополнения методов цифровизации и геоинформационного обеспечения горного производства / С. В.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Корнилков, П. А. Рыбников, Л. С. Рыбникова // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2025. — Т. 67, № 1. — С. 76–85. — https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85.

6. Kamosho J. Foundations of Spatial Data Infrastructure for Underground Mining Operations / J. Kamosho // FIG Congress Proceedings. — Copenhagen : FIG, 2026. — TS08A. — URL: https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2026/papers/ts08a/TS08A_kamosho_14121.pdf (дата обращения: 14.04.2026).

7. Стадник Н. М. Основные методологические принципы формирования комплексной геоинформационной базы для прогнозирования и оценки запасов угля / Н. М. Стадник // Горная промышленность. — 2016. — № 3 (127). — С. 73–76.

8. Стадник Д. А. Обоснование функциональных подсистем единой отраслевой системы автоматизированного проектирования угольных шахт / Д. А. Стадник // Уголь. — 2017. — № 10 (1099). — С. 52–56.

9. Клюев Р. В. Горная разработка и оценка геолого-технических условий карьера «Северный» с использованием математических моделей / Р. В. Клюев, И. И. Босиков, Е. В. Егорова, О. А. Гаврина // Устойчивое развитие горных территорий. — 2020. — № 3. — С. 418–427.

10. Chimunhu P. The future of underground mine planning in the era of machine learning: Opportunities for engineering robustness and flexibility / P. Chimunhu, E. Topal, M. W. A. Asad, R. S. Faradonbeh, A. D. Ajak // Mining Technology. — 2024. — Vol. 134. — https://doi.org/10.1177/25726668241281875.

11. Oubeid N. Block model optimization and resource estimation of the Angouran Mine using indicator kriging and simple kriging methods / N. Oubeid // Journal of Mining and Environment. — 2022. — Vol. 13, No. 2. — P. 325–340. — URL: https://jme.shahroodut.ac.ir/article_2400.html (дата обращения: 14.04.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 622.882:528.48

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifullina I.Yu., Remizov N.A. Mine Surveying Support for Land Reclamation at the Alluvial Gold Deposit of the Bilir Stream: Survey Methodology and Volume Estimation for Grading Works

Маркшейдерское обеспечение рекультивации нарушенных земель на россыпном золотодобывающем месторождении руч. Билир: методика съёмки и подсчёта объёмов планировочных работ

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow
Garifulina Irina Yurievna,
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Remizov Nikita Andreevich,
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 3 курса
направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г.Москва
Гарифулина Ирина Юрьевна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Ремизов Никита Андреевич,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет»

Abstract. *The article deals with methodological aspects of mine surveying support for the engineering stage of land reclamation at the alluvial gold deposit of the Bilir stream (Verkhnye-Indigirsky district, Republic of Sakha (Yakutia)). The site features a large disturbed land area (~85 ha), complex terrain, permafrost, and specific technogenic landforms: gravel and slime dredge tailings and bulldozer excavations. Three mine surveying methods are examined: electronic total station, RTK GNSS, and UAV-based aerial photography with SfM processing. Accuracy, labour intensity and applicability are assessed for each method. Volume estimation was performed using the cross-section method and DEM differencing. UAV/SfM with DEM differencing provides the best accuracy-to-productivity ratio for areas exceeding 10 ha. Total grading volume amounted to 1,248,000 m³. Findings are applicable to reclamation design for analogous alluvial deposits in the permafrost zone.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Keywords: *mine surveying, land reclamation, alluvial deposit, UAV, SfM photogrammetry, RTK GNSS, digital elevation model, cross-section method, permafrost, gold mining.*

Аннотация. *Статья посвящена методическим аспектам маркшейдерского сопровождения горнотехнического этапа рекультивации нарушенных земель на россыпном золотодобывающем месторождении ручья Билир (Верхне-Индигирский район, Республика Саха (Якутия)). Объект характеризуется значительной площадью нарушенных земель (~85 га), сложным рельефом, наличием многолетнемёрзлых пород и специфическими типами техногенного рельефа: галечными и эфельными отвалами дражных полигонов, а также бульдозерными выемками. В работе рассмотрены три метода маркшейдерской съёмки: электронная тахеометрия, спутниковое позиционирование в режиме RTK ГНСС и аэрофотосъёмка с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с обработкой по технологии SfM. Для каждого метода дана оценка точности, трудоёмкости и области применения. Подсчёт объёмов планировочных работ выполнен методом поперечных профилей и методом ЦМР-разности. Установлено, что применение БПЛА в сочетании с методом ЦМР-разности обеспечивает наилучшее соотношение точности и производительности при площади свыше 10 га. Суммарный объём планировочных работ составил 1 248 тыс. м³. Результаты применимы при проектировании рекультивации аналогичных россыпных месторождений в криолитозоне.*

Ключевые слова: *маркшейдерская съёмка, рекультивация нарушенных земель, россыпное месторождение, БПЛА, SfM-фотограмметрия, RTK ГНСС, цифровая модель рельефа, метод поперечных профилей, вечная мерзлота.*

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

Введение. Разработка россыпных месторождений золота относится к числу наиболее экологически травматичных видов горнодобывающей деятельности. По различным оценкам, в России ежегодно в результате открытой разработки россыпей нарушается свыше 20 тыс. га земель, из которых восстанавливается не более 30–40% [1]. Открытые способы добычи — дражный и бульдозерный — неизбежно сопряжены с полным нарушением почвенно-растительного покрова, деформацией русел водотоков, формированием масштабных техногенных ландшафтов в виде галечных гряд, эфельных отвалов и выемок [1, 2]. Для регионов криолитозоны, в частности Республики Саха (Якутия), нарушение деятельного слоя вечномёрзлых пород дополнительно инициирует термоэрозионные процессы и существенно затрудняет естественное самовосстановление экосистем [3]. Таким образом, проведение горнотехнического этапа рекультивации является безальтернативным условием экологического восстановления нарушенных территорий.

Нормативными документами — Федеральным законом «Об охране окружающей среды» (№ 7-ФЗ от 10.01.2002), Постановлением Правительства РФ от 10.07.2018 № 800 «О проведении рекультивации и консервации земель», а также РД 07-603-03 «Инструкция по производству маркшейдерских работ» — предусмотрено обязательное маркшейдерское сопровождение горнотехнического этапа рекультивации [4]. Согласно п. 53 РД 07-603-03, маркшейдерские работы при рекультивации включают: подготовку графической документации для проектирования, маркшейдерское обеспечение

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

непосредственно горнотехнических работ и исполнительную съёмку рекультивированных территорий.

В последнее десятилетие широкое распространение в маркшейдерской практике получила аэрофотосъёмка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сочетании с алгоритмами Structure from Motion (SfM). Данная технология позволяет в короткие сроки создавать высокоточные цифровые модели рельефа (ЦМР) обширных территорий и проводить автоматизированный подсчёт объёмов планировочных операций при рекультивации [5–7]. Вместе с тем практика маркшейдерского обеспечения рекультивации на россыпных месторождениях Якутии остаётся недостаточно освещённой в специальной литературе в части сравнительной оценки точности альтернативных методов съёмки и специфики подсчёта объёмов планировки на объектах с дифференцированным техногенным рельефом.

Цель настоящей работы — разработка и обоснование методики маркшейдерской съёмки и подсчёта объёмов планировочных работ при рекультивации нарушенных земель месторождения ручья Билир с оценкой точности и производительности применяемых методов.

Материалы и методы

Описание объекта исследования

Месторождение россыпного золота ручья Билир расположено в Верхне-Индигирском районе Республики Саха (Якутия), в 47 км к юго-востоку от п. Усть-Нера (63°52′ с.ш., 143°18′ в.д.). В геоморфологическом отношении район относится к среднегорью Верхоянской горной системы (отметки водоразделов 1 050–1 380 м, долин — 640–780 м). Долина ручья Билир имеет ящикообразное сечение шириной 180–320 м. Мощность многолетнемёрзлых пород составляет 100–250 м, среднегодовая температура грунта на глубине 10 м — минус 4,5…минус 6,2 °С. Деятельный слой оттаивает на глубину 0,6–1,4 м в зависимости от типа грунта и экспозиции склона [3].

Россыпь разрабатывалась в 1978–2009 гг. До 1991 г. применялся дражный способ (протяжённость хода 4,2 км, ширина промывки 55–80 м); в дальнейший период — бульдозерный на фланговых и техногенных участках. По результатам маркшейдерской инвентаризации 2023 г. общая площадь нарушенных земель составила 85,3 га (таблица 1).

Таблица 1

Распределение нарушенных земель по типам

Тип нарушения	Площадь, га	Мощность тела, м
Галечные отвалы дражных полигонов	42,7	1,5–8,4
Эфельные отвалы	18,6	0,4–2,1
Дражные пруды и обводнённые выемки	9,4	—
Бульдозерные выемки и берма	14,6	—
Итого	85,3	—

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Методы маркшейдерской съёмки

Съёмка выполнялась в три этапа (2023–2024 гг.) тремя методами.

Тахеометрическая съёмка производилась прибором Leica TS06 plus (угловая точность 5″). Съёмочное обоснование создавалось методом разомкнутого теодолитного хода от пунктов ГГС. СКО определения координат съёмочного обоснования: плановое ±0,04 м, высотное ±0,05 м. Производительность — до 1,5 га/смену.

Спутниковая съёмка в режиме RTK ГНСС выполнялась комплектом Trimble R10 (базовый + ровер). Точность фиксированного решения: в плане ±0,02 м, по высоте ±0,03 м. Производительность — до 4 га/смену.

Аэрофотосъёмка с БПЛА производилась мультикоптером DJI Matrice 300 RTK с камерой Zenmuse P1 (45 Мп, объектив 35 мм). Высота полёта 80–120 м, продольное перекрытие 80%, поперечное 75%, GSD 1,7–2,5 см/пиксель. Координаты опорных точек (ОТ) определялись методом RTK ГНСС (5–12 ОТ на участок, периметральное размещение). Обработка в Agisoft Metashape 2.0 (технология SfM + Dense Stereo Matching), шаг сетки ЦМР 10 см. Производительность — до 40 га за один вылет (~60 мин).

Методы подсчёта объёмов

Метод поперечных профилей применялся на участках с вытянутой формой в плане. Профили разбивались с шагом 25–50 м. Объём между смежными профилями вычислялся методом среднего сечения ф-ла. 1:

$$V_{i,i+1} = \frac{(F_i + F_{i+1})}{2} \cdot l_{i,i+1},$$

1.

где F(i) — площадь поперечного сечения (разность проектной и фактической поверхностей), l(i,i+1) — расстояние между профилями. Погрешность при шаге 25 м — 5–8%.

Метод ЦМР-разности основан на вычитании ЦМР исходного рельефа и проектного рельефа: $\triangle Z = Z(\text{факт}) - Z(\text{проект})$. Объём срезки и засыпки вычислялись суммированием значений $\triangle Z$ по ячейкам сетки (шаг 0,10 м). Погрешность метода при данном шаге сетки — 2–4%. Расчёт выполнялся в QGIS 3.28 (растровый калькулятор) и Agisoft Metashape 2.0.

Результаты

Сравнение точности методов съёмки

Точностные характеристики оценивались по 36 контрольным точкам (12 — галечные отвалы, 8 — эфельные отвалы, 10 — бульдозерные выемки, 6 — заболоченная пойма), измеренным нивелиром Leica DNA03 и GPS-приёмником в режиме статики.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 2

Сравнение точностных и производственных характеристик методов маркшейдерской съёмки

Параметр	Тахеометрия	RTK ГНСС	БПЛА / SfM
СКО плановое, м	0,025	0,022	0,048
СКО высотное, м	0,030	0,035	0,065
Макс. погрешность по высоте, м	0,065	0,078	0,142
Производительность, га/смена	1,5	4,0	35–40
Штат, чел.	2–3	1–2	1–2
Затраты, руб./га	12 500	6 800	1 200

Примечание: производительность БПЛА — при высоте 100 м, GSD 2,5 см/пиксель, 5–7 ОТ на участок.

Все три метода при соблюдении требований к плановому обоснованию обеспечивают точность, достаточную для маркшейдерского учёта (СКО по высоте ≤ 0,10 м для масштаба 1:2000 с сечением рельефа 1,0 м) [4].

Точность ЦМР по данным БПЛА при различных высотах

Экспериментальные полёты на высотах 80, 100, 120 и 150 м показали линейный рост СКО по высоте: 0,045; 0,065; 0,088 и 0,115 м соответственно (рисунок 1). При этом площадь покрытия за один маршрут при 150 м в 3,5 раза превышает таковую при 80 м. Оптимальной для условий данного объекта признана высота 100 м (GSD 2,5 см/пиксель, СКО ≈ 0,065 м).

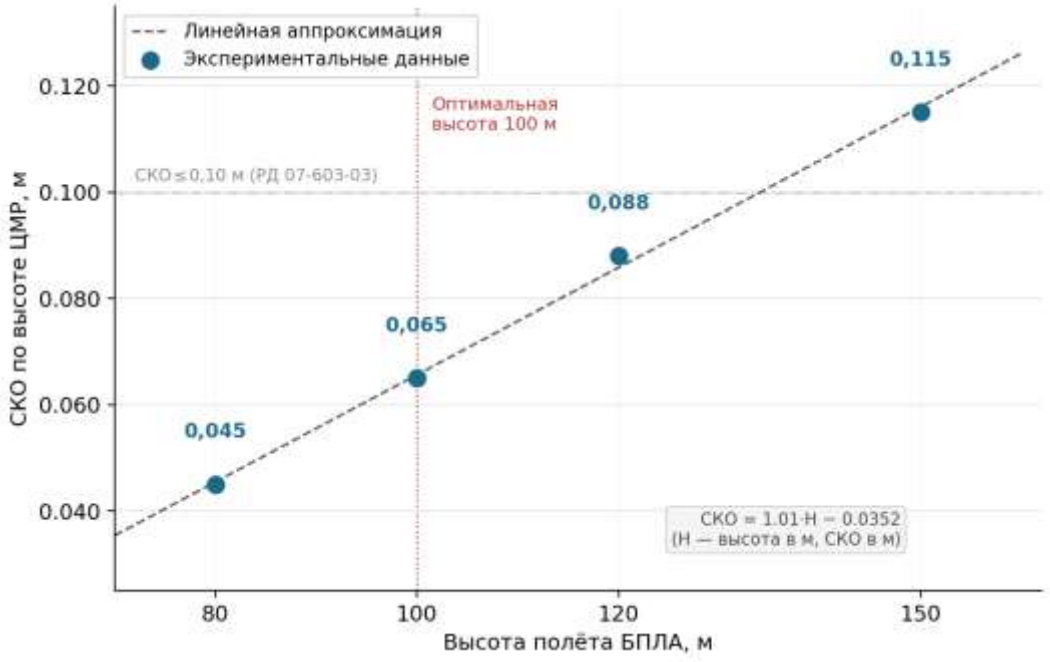


Рисунок 1 — Зависимость СКО по высоте ЦМР от высоты полёта БПЛА

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Подсчёт объёмов планировочных работ

Для дражного полигона № 3 (14,8 га, длина 1 240 м) разбито 49 поперечных профилей с шагом 25 м. Фрагмент ведомости приведён в таблице 3.

Таблица 3

Фрагмент ведомости подсчёта объёмов (полигон № 3, ПК0 — ПК+100)

№ профиля	Расстояние, м	F срезки, м²	F насыпи, м²	V срезки, м³	V насыпи, м³
ПК0	—	38,4	12,6	—	—
ПК+25	25	41,2	10,8	997	293
ПК+50	25	55,7	8,3	1 211	239
ПК+75	25	63,1	6,9	1 485	190
ПК+100	25	58,4	9,4	1 519	204
Итого ПК0–ПК+100				5 212	926

Примечание: объём насыпи включает коэффициент откоса K = 1,15.

По всему объекту (85,3 га, 4 выдела) суммарный объём планировочных работ: срезка — 876 тыс. м³, засыпка — 372 тыс. м³, итого — 1 248 тыс. м³. По методу ЦМР-разности: срезка — 871 тыс. м³, засыпка — 376 тыс. м³, итого — 1 247 тыс. м³. Расхождение между методами составило 0,08%, что подтверждает корректность расчётов. Наибольшая доля планировочных работ приходится на галечные отвалы дражных полигонов (67% общего объёма) [8].

Обсуждение

Сравнение методов по критериям точности, трудоёмкости и стоимости

Полученные результаты подтверждают тенденцию, отмечаемую в отечественной и зарубежной литературе: метод БПЛА/SfM существенно превосходит традиционные методы наземной геодезии по производительности и экономической эффективности при сопоставимой точности [5–7, 9]. При площади менее 2 га тахеометрия остаётся предпочтительной ввиду высокой точности и независимости от погодных условий. В диапазоне 2–10 га экономически целесообразен RTK ГНСС. Свыше 10 га оптимально применение БПЛА: стоимость снижается в 5–10 раз, производительность возрастает на порядок [10].

Установлено, что оптимальная плотность ОТ для БПЛА-съёмки составляет 0,6–0,8 точки/га при периметральном размещении с дополнительными точками в центральной части. Дальнейшее увеличение сверх 8 ОТ на 10 га не даёт значимого повышения точности.

Метод ЦМР-разности обеспечивает точность 2–4% против 5–12% при методе профилей (шаг 25 м) и является предпочтительным при наличии БПЛА-данных.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Применение материалов БПЛА-съёмки для официальных маркшейдерских планов масштаба 1:2000 не противоречит требованиям РД 07-603-03 [4].

Особенности применения методов в условиях вечной мерзлоты

Условия многолетней мерзлоты накладывают принципиальные ограничения на все методы. Для тахеометрии и RTK ГНСС основная проблема — нестабильность грунта в основании штативов: смещения временных ориентиров до 1–3 см за рабочую смену в тёплый период. Для БПЛА-съёмки ключевым ограничением является короткий безморозный период (середина июня — середина сентября), что требует обязательного резервирования полётных окон.

При повторных съёмках зафиксированы расхождения ЦМР до 0,12–0,18 м в пределах вегетационного сезона за счёт неравномерного оттаивания деятельного слоя. Плановая и контрольная съёмки для подсчёта объёмов должны выполняться в сопоставимые фазы сезона. Сезонное пучение эфельных и галечных отвалов (0,05–0,08 м за зимний период) рекомендуется учитывать поправочным коэффициентом 1,05–1,08.

Рекомендации по выбору метода

На основании проведённого исследования предлагается следующая схема маркшейдерского обеспечения рекультивации:

1. Исходная инвентаризационная съёмка (>20 га) — БПЛА/SfM, шаг ЦМР 0,1–0,2 м, ≥8 ОТ, конец июня — июль.

2. Детальная съёмка сложных элементов (откосы, дренажные канавы, плотины) — тахеометрия или RTK ГНСС.

3. Оперативный контроль объёмов (ежемесячно, 2–15 га) — RTK ГНСС, шаг профилей 25 м; при наличии ОТ допустимо БПЛА.

4. Итоговая исполнительная съёмка — БПЛА/SfM с контролем по 10–15 независимым точкам.

Заключение

1. Маркшейдерская съёмка тремя методами показала, что все три при соблюдении требований к плановому обоснованию обеспечивают точность, достаточную для задач рекультивационного проектирования: СКО по высоте 0,030; 0,035 и 0,065 м соответственно.

2. Метод БПЛА/SfM наиболее экономически эффективен при площади свыше 10 га: стоимость ~1 200 руб./га, производительность в 20–25 раз выше тахеометрии. Применение в условиях криолитозоны требует привязки съёмок к одинаковым фазам сезонного оттаивания.

3. Общая площадь нарушенных земель — 85,3 га, суммарный объём планировочных работ — 1 248 тыс. м³ (876 тыс. м³ срезки и 372 тыс. м³ засыпки).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Расхождение между результатами методов поперечных профилей и ЦМР-разности составило 0,08%.

4. В условиях многолетней мерзлоты при планировании насыпных работ рекомендуется применять поправочный коэффициент на сезонное пучение 1,05–1,08.

5. Предложенная методика применима при проектировании рекультивации аналогичных россыпных месторождений в Арктической и Субарктической зонах России.

References

1. Михайлов А. Г., Зайцева Н. В. Экологические последствия освоения россыпных месторождений золота в бассейне Индигирки // Горный журнал. — 2019. — № 7. — С. 72–78. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.13

2. Голубев В. Н., Сметанников А. Ф. Рекультивация нарушенных земель на предприятиях россыпной золотодобычи: состояние и перспективы // Цветные металлы. — 2020. — № 3. — С. 23–30. DOI: 10.17580/tsm.2020.03.03

3. Федоров А. Н., Боескоров В. С. Реакция мерзлотных экосистем на техногенное воздействие в Якутии // Криосфера Земли. — 2021. — Т. XXV. — № 4. — С. 45–56. DOI: 10.15372/KZ20210405

4. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ / Госгортехнадзор России. — Москва, 2003. — 160 с.

5. Колесатова О. А., Матвеев А. В. Применение беспилотных летательных аппаратов для маркшейдерской съёмки объектов открытых горных работ // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2020. — № 8. — С. 14–22. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-14-22

6. Трегуб А. И., Стукалов Д. А. Точностные характеристики RTK ГНСС при геодезическом обеспечении горных работ // Маркшейдерский вестник. — 2021. — № 2. — С. 35–42.

7. Clapuyt F., Vanacker V., Van Oost K. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms // Geomorphology. — 2016. — Vol. 260. — P. 4–15. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.011

8. ГОСТ 17.5.3.04-83. Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 8 с.

9. Carbonneau P. E., Dietrich J. T. Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS // Earth Surface Processes and Landforms. — 2017. — Vol. 42. — № 3. — P. 473–486. DOI: 10.1002/esp.4012

10. Guo Q., Su Y., Hu T. LiDAR and its applications in mining operations // International Journal of Mining Science and Technology. — 2018. — Vol. 28. — № 3. — P. 537–544. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.03.001

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 622.882:528.48

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Semykin E.S., Sharov P.E. Evaluation of the accuracy of determining the volumes of overburden and production sands during bulldozer development of a placer deposit using GNSS surveying and digital terrain modeling

Оценка точности определения объёмов вскрыши и добычных песков при бульдозерной разработке россыпи методами ГНСС-съёмки и цифрового моделирования рельефа

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow
Semykin Evgeny Sergeevich
Senior Lecturer of the Department of Hygiene and Public Health,
Senior Lecturer of the Department of ETS,
North-Eastern Federal University, Magadan
Sharov Pavel Egorovich,
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 3 курса
направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г.Москва
Семыкин Евгений Сергеевич,
Старший преподаватель кафедры ГиГД
ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Шаров Павел Егорович,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *The paper presents a comparative accuracy assessment of overburden and pay gravel volume determination at an alluvial gold placer polygon using three mine surveying methods: total station surveying (reference method), RTK GNSS kinematic surveying, and UAV-based aerial photogrammetry with Structure-from-Motion (SfM) processing. The study site is the Darpir Creek alluvial deposit (Yagodninskiy District, Magadan Oblast), worked by bulldozer mining. The study area covers 38.4 ha with a 1,680 m working face. Digital elevation models (DEMs) were produced before and after excavation for each method; volumes were computed by the average cross-section method and by DEM differencing.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

DEM accuracy was validated at 48 checkpoints. RTK GNSS yielded volume errors ≤1.0% for overburden and ≤1.0% for pay gravels at a DEM grid step of 0.5–1.0 m. UAV/SfM photogrammetry at 90 m flight altitude produced pay-gravel volume errors of 3.0–3.5% for seam thickness below 1.5 m, exceeding the ±2% tolerance prescribed by RD 07-603-03. Combined use of RTK GNSS and DEM differencing reduces mine-survey labour costs by a factor of 2.8–3.2 compared with conventional total-station surveys while maintaining regulatory accuracy.

Keywords: *GNSS survey, RTK, digital elevation model, bulldozer mining, alluvial deposit, mine surveying, volume accuracy, overburden.*

Аннотация. *Статья посвящена сравнительной оценке точности определения объёмов вскрыши и добычных песков на россыпном золотоносном полигоне при использовании трёх методов маркшейдерской съёмки: тахеометрии (эталонный метод), кинематической спутниковой съёмки RTK ГНСС и аэрофотосъёмки с БПЛА в режиме структуры из движения (SfM). Объектом исследования послужило россыпное месторождение ручья Дарпир (Ягоднинский район, Магаданская область), разрабатываемое бульдозерным способом. Площадь исследуемого участка составила 38,4 га, длина — 1 680 м. Для каждого метода построены цифровые модели рельефа (ЦМР) до и после выемки горной массы; объёмы определены методом среднего сечения и методом ЦМР-разности. Точность ЦМР верифицирована по 48 контрольным точкам. Показано, что метод RTK ГНСС обеспечивает погрешность объёма вскрыши не более 1,0% и объёма добычных песков не более 1,0% при шаге сетки ЦМР 0,5–1,0 м. Метод БПЛА/SfM при высоте съёмки 90 м даёт погрешность объёма добычных песков 3,0–3,5% при мощности пласта менее 1,5 м, что превышает нормативный допуск ±2% по РД 07-603-03. Применение RTK ГНСС совместно с методом ЦМР-разности позволяет сократить трудозатраты на маркшейдерский учёт в 2,8–3,2 раза по сравнению с традиционной тахеометрией при сохранении нормативной точности.*

Ключевые слова: *ГНСС-съёмка, RTK, цифровая модель рельефа, бульдозерная разработка, россыпное месторождение, маркшейдерский учёт, точность определения объёмов, вскрыша.*

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

Введение. Маркшейдерский учёт объёмов горных работ является обязательным условием безопасной и экономически обоснованной добычи на россыпных месторождениях. При бульдозерном способе разработки, преобладающем на россыпных полигонах Магаданской области и Северо-Востока России в целом, точный подсчёт объёмов вскрыши и добычных песков непосредственно определяет достоверность горно-геологической документации, плановые показатели горного отвода и расчёты по договорам подряда. Действующая нормативная база — РД 07-603-03 «Инструкция по производству маркшейдерских работ» (пп. 34–38) [4] и Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 № 550 [2-5] — устанавливает допуск относительной погрешности подсчёта объёмов не более ±2% и требует регулярного маркшейдерского контроля горных работ с периодичностью, соответствующей утверждённому проекту.

Традиционно объёмы на россыпных полигонах определяются методом поперечных профилей с применением электронных тахеометров. Этот метод отличается высокой точностью, однако весьма трудоёмок: съёмка участка площадью 38–40 га требует 3–4 смен работы бригады из двух человек, а обработка профилей в условиях пересечённого бульдозерного микрорельефа сопряжена с субъективными ошибками интерполяции [1, 6]. Развитие кинематической спутниковой геодезии (RTK

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ГНСС) и беспилотной аэрофотосъёмки (БПЛА/SfM) открыло принципиально новые возможности для маркшейдерии открытых горных работ: автоматизированное построение плотных цифровых моделей рельефа (ЦМР) и подсчёт объёмов методом ЦМР-разности [2, 3, 7, 8]. Однако для условий бульдозерной разработки россыпей, характеризующейся интенсивным пересечённым микрорельефом (борозды, гребни, насыпи отвалов высотой более 3 м), точность указанных методов изучена недостаточно [10].

Цель настоящего исследования — выполнить сравнительную оценку точности и трудоёмкости методов RTK ГНСС и БПЛА/SfM при подсчёте объёмов вскрыши и добычных песков на бульдозерном полигоне россыпного месторождения ручья Дарпир и выработать рекомендации по выбору метода маркшейдерской съёмки в соответствии с нормативными требованиями.

Материалы и методы. Объект исследования - россыпное месторождение ручья Дарпир расположено в Ягоднинском районе Магаданской области (59°42′ с.ш., 151°18′ в.д.) и относится к типичным долинно-террасовым россыпям Северо-Востока России [10]. Долина ручья имеет трапециевидное поперечное сечение шириной 80–120 м; уклон плотика — 0,008–0,012. Мощность торфов (вскрышных пород) составляет 2,8–7,4 м, мощность пласта добычных песков — 0,6–2,2 м. Коэффициент вскрыши — 3,8 м³/м³. Добыча ведётся бульдозерами CAT D9T и Komatsu D375A с промывкой на промприборе ПГШ-50.

Объектом полевых исследований стал отработанный в полевой сезон 2023 г. горный блок длиной 1 680 м и средней шириной 22,8 м; площадь участка — 38,4 га. Съёмка выполнена в два цикла: первый цикл (до/после снятия торфов) — определение объёма вскрыши; второй цикл (до/после добычи песков) — определение объёма добычных песков.

Методы съёмки

Тахеометрическая съёмка (эталонный метод) выполнена прибором Leica TS06 plus (угловая точность 5″). Метод поперечных профилей с шагом 20 м; пикеты фиксировались через 1–3 м в зависимости от сложности микрорельефа. Общее число пикетов за оба цикла — 28 430. Привязка к пунктам ГГС 3-го класса.

Кинематическая спутниковая съёмка RTK ГНСС выполнена приёмником Trimble R10 (двухчастотный, L1/L2/L5; точность в режиме RTK: плановая ±8 мм + 1 ppm, высотная ±15 мм + 1 ppm). Базовая станция установлена на пункте ГГС; расстояние до ровера не превышало 4,2 км. Точки съёмки — по регулярной сетке 5×5 м на профилях

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

с шагом 20 м. ЦМР строились в Trimble Business Center 5.4 с шагами ячейки 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 м.

Аэрофотосъёмка с БПЛА выполнена комплексом DJI Matrice 300 RTK с камерой Zenmuse P1 (45 МПикс, фокусное расстояние 35 мм). Высота полёта 90 м, GSD 2,3 см/пиксель, перекрытие 80%/75%, 8 опорных точек. Обработка в Agisoft Metashape Professional 2.0 (SfM + Dense Stereo Matching), шаг ЦМР 0,05 м; для сравнительного анализа строились ЦМР с шагами 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 м.

Методы подсчёта объёмов

Метод среднего сечения применялся для данных тахеометрии и RTK-профилей. Объём горной массы между двумя смежными профилями определяется по формуле (1):

$$V_{i,i+1} = \frac{(F_i + F_{i+1})}{2} \cdot l_{i,i+1},$$

1.

где F_i, F_{i+1} — площади поперечных сечений на смежных профилях *i* и *i+1*, м²; $l_{i,i+1}$ — расстояние между профилями, м. Суммарный объём по блоку: $V = \Sigma V_{i,i+1}$.

Метод ЦМР-разности применялся для RTK-ЦМР и БПЛА-ЦМР. Объём вычисляется по формуле (2):

$$V = \Sigma (\Delta Z_k \cdot S_k) \quad 2.$$

где $\Delta Z_k = Z_{факт(k)} - Z_{проект(k)}$ — разность отметок ЦМР k-й ячейки, м; S_k — площадь k-й ячейки, м².

Для количественного сравнения методов использована формула относительной погрешности (3):

$$\delta V = |V_м - V_{эт}| / V_{эт} \cdot 100\% \quad 3.$$

где $V_{метод}$ — объём, определённый исследуемым методом; Vэталон — объём по тахеометрии (эталон), тыс. м³.

Контрольные измерения

Для независимой верификации точности ЦМР заложены 48 контрольных точек (шаг ~90 м). Координаты определены статическим GPS (точность ±5 мм), отметки — нивелированием III класса (Leica DNA03, точность ±1,5 мм/км). По контрольным точкам вычислены СКО планового и высотного положения, а также максимальная погрешность по высоте для каждого метода.

Результаты

Точностные характеристики ЦМР - равнение ЦМР трёх методов с 48 контрольными точками показало следующие результаты (таблица 1). Максимальные погрешности по высоте для БПЛА/SfM (до 0,134 м) локализованы в зонах крутых

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

откосов отвалов (угол откоса >30°) вследствие эффекта затенения в плотном облаке точек SfM [7, 9].

Таблица 1

Точностные характеристики методов маркшейдерской съёмки

Параметр	Тахеометрия (эталон)	RTK ГНСС	БПЛА/SfM
СКО плановое, м	0,020	0,018	0,041
СКО высотное, м	0,025	0,032	0,058
Макс. погрешность по высоте, м	0,052	0,071	0,134
Производительность, га/смену	1,2	3,5	28–32
Затраты, руб./га	15 800	7 200	1 450

Сравнение объёмов вскрыши

Суммарный объём вскрышных торфов (38,4 га, 1 680 м × 22,8 м), определённый эталонным методом тахеометрии, составил 892 тыс. м³. Результаты по остальным методам: RTK ГНСС (профили) — 889 тыс. м³ (δV = −0,3%); RTK ЦМР-разность — 895 тыс. м³ (δV = +0,3%); БПЛА ЦМР-разность — 901 тыс. м³ (δV = +1,0%). Все значения не выходят за пределы нормативного допуска ±2% по РД 07-603-03 [4].

Сравнение объёмов добычных песков

Суммарный объём добычных песков (эталон): 134 тыс. м³. Результаты: RTK ГНСС (профили) — 133 тыс. м³ (δV = −0,7%); RTK ЦМР-разность — 135 тыс. м³ (δV = +0,7%); БПЛА ЦМР-разность — 138 тыс. м³ (δV = +3,0%). Результат БПЛА/SfM для добычных песков (+3,0%) превысил нормативный допуск ±2%. Для участков с мощностью пласта менее 1,5 м погрешность БПЛА достигает 3,5%.

Таблица 2

Сравнение результатов подсчёта объёмов по блоку № 1 (длина 420 м)

Метод съёмки	V вскрыши, тыс. м³	Отклонение, %	V песков, тыс. м³	Отклонение, %
Тахеометрия (эталон)	198,4	—	28,6	—
RTK профили	197,8	−0,3	28,4	−0,7
RTK ЦМР-разность	199,1	+0,4	28,8	+0,7
БПЛА ЦМР-разность	200,6	+1,1	29,5	+3,1

Зависимость погрешности от шага сетки ЦМР

Исследование влияния шага сетки ЦМР на относительную погрешность объёма показало закономерное нарастание ошибки при укрупнении шага (рисунок 1). При шаге сетки ≤1,0 м оба метода удовлетворяют нормативному допуску ±2% для объёмов вскрыши. Для объёмов добычных песков при шаге ≥2,0 м оба метода выходят за

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

пределы допуска; при шаге 1,0 м БПЛА-ЦМР не соответствует требованиям для пластов мощностью <1,5 м.

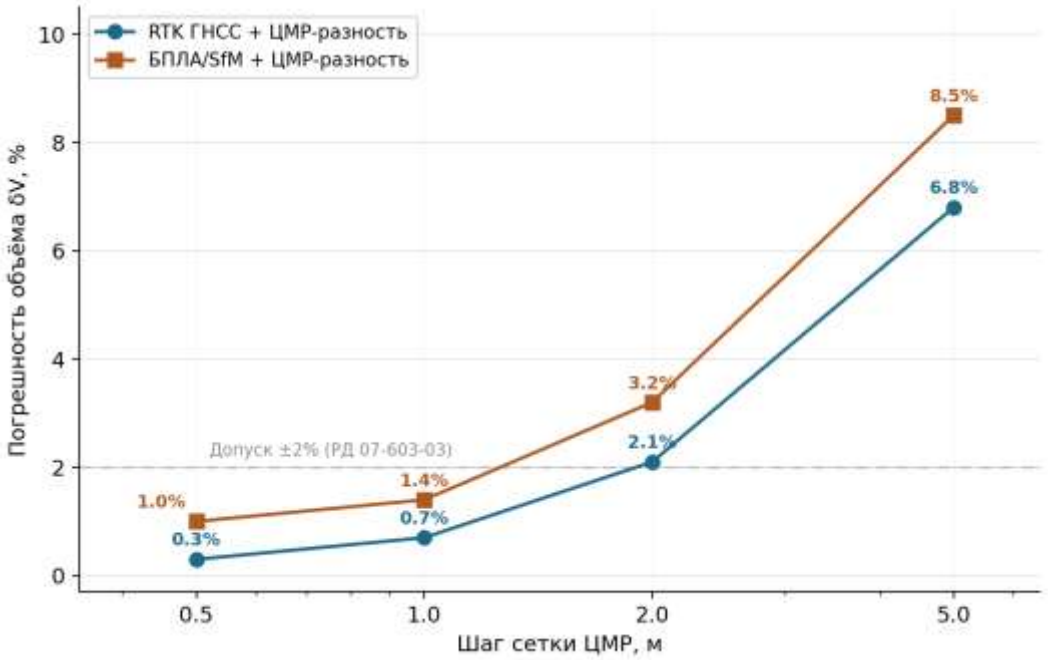


Рисунок 1 — Зависимость погрешности объёма от шага сетки ЦМР

Сравнительная диаграмма объёмов

Диаграмма объёмов вскрыши и добычных песков по четырём методам приведена на рисунке 2. Горизонтальными линиями обозначены границы допуска ±2% от эталонного значения. Видно, что метод БПЛА/SfM незначительно выходит за допуск по объёму добычных песков.

Обсуждение

Точность методов для объёмов вскрыши

Для крупных объектов (объём вскрыши >100 тыс. м³) все три метода продемонстрировали относительную погрешность менее 2%, что соответствует нормативному допуску РД 07-603-03 [4] и согласуется с результатами аналогичных исследований на карьерах [8]. При экономическом сравнении метод RTK ГНСС в 2,2 раза дешевле тахеометрии, а БПЛА/SfM — в 10,9 раза дешевле при практически одинаковой точности для вскрыши.

Точность методов для добычных песков

Добычные пески представляют особый случай: мощность пласта 0,6–2,2 м значительно меньше мощности вскрыши, а после отработки вскрыши поверхность плотика сохраняет бульдозерные борозды с амплитудой до 0,15–0,20 м. В таких условиях высотная ошибка ЦМР составляет значимую долю от мощности объекта. Для

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

БПЛА/SfM при высоте полёта 90 м СКО высотного положения 0,058 м при мощности пласта 0,6–1,5 м порождает погрешность объёма 3,0–3,5%, превышающую допуск [4, 5].

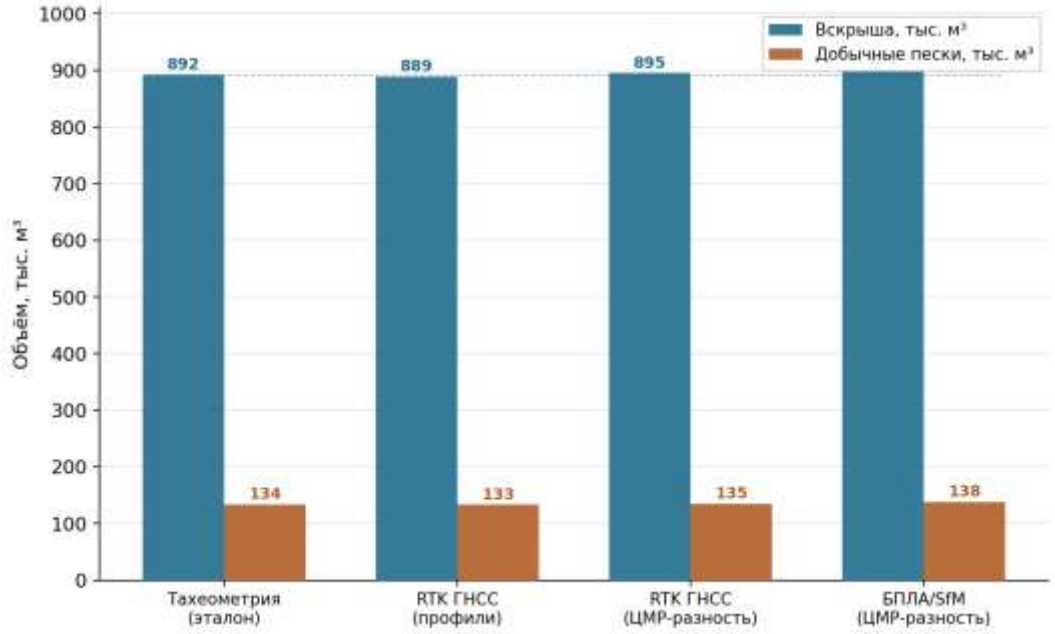


Рисунок 2 — Сравнение объёмов вскрыши и добычных песков по методам

RTK ГНСС при шаге сетки ≤1,0 м обеспечивает погрешность ≤1,0% для добычных песков при всех значениях мощности пласта в исследованном диапазоне, что согласуется с рекомендациями Трегуба и Стукалова [2].

Ограничения метода БПЛА при бульдозерных работах

Специфика бульдозерного микрорельефа — борозды глубиной 0,10–0,20 м, поперечные валы высотой до 0,50 м, откосы отвалов крутизной 28–34° — существенно снижает точность SfM-реконструкции. При вертикальной съёмке боковые поверхности откосов видны лишь с одного-двух маршрутов, образуя «тени» в плотном облаке точек [7]. Применение наклонных маршрутов (15–20° от надира) или увеличение бокового перекрытия до 85% может снизить высотную погрешность до 0,030–0,040 м на крутых откосах.

Рекомендации по выбору метода

На основании полученных результатов предлагается следующая схема применения методов маркшейдерской съёмки:

1. RTK ГНСС — основной метод официального маркшейдерского учёта объёмов как вскрыши, так и добычных песков; шаг сетки ЦМР 0,5–1,0 м; рекомендуется для обоих циклов съёмки.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2. БПЛА/SfM — вспомогательный метод для оперативного мониторинга и инвентаризации; допустим для учёта вскрыши, но не рекомендован для учёта добычных песков при мощности пласта <1,5 м.

3. Тахеометрия — применяется при разногласиях между методами, в труднодоступных зонах и при необходимости повышенной точности.

Экономический эффект

Применение RTK ГНСС совместно с методом ЦМР-разности позволяет сократить общее время маркшейдерского цикла с 16–18 чел.-часов (тахеометрия) до 5,5–6,5 чел.-часов (RTK). Коэффициент снижения трудозатрат — 2,8–3,2. При стандартной частоте замеров 2 раза в месяц за полевой сезон (5 месяцев) экономия составляет 96 000–112 000 руб. на один участок (в ценах 2023 г.).

Заключение

1. СКО высотного положения ЦМР составила: тахеометрия — 0,025 м, RTK ГНСС — 0,032 м, БПЛА/SfM — 0,058 м. Все три метода соответствуют нормативам топографической съёмки масштаба 1:2000 для открытых площадей, что подтверждает их принципиальную пригодность для маркшейдерских работ.

2. Точность объёмов вскрыши (>100 тыс. м³) для всех методов не превышает допуска ±2% по РД 07-603-03: RTK ГНСС — ≤1,0%, БПЛА/SfM — ≤1,5%. Оба метода могут применяться для официального маркшейдерского учёта вскрышных работ на бульдозерных полигонах.

3. Точность объёмов добычных песков при мощности пласта <1,5 м: БПЛА/SfM (высота полёта 90 м) — погрешность 3,0–3,5%, превышает допуск ±2%; RTK ГНСС при шаге сетки ≤1,0 м — погрешность ≤1,0%, соответствует нормативным требованиям. RTK ГНСС является единственным из рассмотренных современных методов, обеспечивающим нормативную точность для учёта добычных песков при малых мощностях пласта.

4. Оптимальный шаг сетки ЦМР: для RTK ГНСС — 0,5–1,0 м; для БПЛА/SfM при высоте полёта 90 м — 0,2–0,3 м (что требует снижения высоты полёта до 40–50 м для достижения GSD 1,0–1,2 см/пиксель).

5. Применение RTK ГНСС совместно с методом ЦМР-разности позволяет сократить трудозатраты на маркшейдерский учёт объёмов в 2,8–3,2 раза по сравнению с тахеометрическим методом поперечных профилей при полном соблюдении нормативной точности по РД 07-603-03 и Приказу Ростехнадзора № 550 (2020).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Выстрчил М. Г. Методика оптимизации вскрышных работ с использованием системы автоматизированного позиционирования бульдозера / М. Г. Выстрчил, Т. И. Балтыжакова, В. В. Пименов, С. Ю. Новоженин, А. А. Боголюбова // Вестник СГУГиТ. — 2023. — Т. 28, № 4. — С. 12–21. — DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-4-12-21.

2. Hugenholtz C. H. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model / C. H. Hugenholtz, K. Whitehead, O. W. Brown, T. E. Barchyn // Geomorphology. — 2013. — Vol. 194. — P. 16–24. — DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.03.023.

3. Siebert S. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system / S. Siebert, J. Teizer // Automation in Construction. — 2014. — Vol. 41. — P. 1–14. — DOI: 10.1016/j.autcon.2014.01.004.

4. Uysal M. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill / M. Uysal, A. S. Toprak, N. Polat // Measurement. — 2015. — Vol. 73. — P. 539–543. — DOI: 10.1016/j.measurement.2015.06.010.

5. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ [Электронный ресурс] / Госгортехнадзор России. — М., 2003. — URL: http://enis.gosnadzor.ru/activity/control/geology/РД%2007-603-03.pdf (дата обращения: 12.04.2026).

6. Инструкция по маркшейдерскому учёту объёмов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом [Электронный ресурс] : утв. приказом Ростехнадзора от 06.06.2003 № 74 (с изм. на 24.01.2018). — URL: https://docs.cntd.ru/document/901865300 (дата обращения: 11.04.2026).

7. Hugenholtz C. H., Whitehead K., Brown O. W. et al. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model // Geomorphology. — 2013. — Vol. 194. — P. 16–24. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.03.023

8. Siebert S., Teizer J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system // Automation in Construction. — 2014. — Vol. 41. — P. 1–14. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.01.004

9. Uysal M., Toprak A. S., Polat N. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill // Measurement. — 2015. — Vol. 73. — P. 539–543. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.06.010

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

INDUSTRIAL RESEARCH AND PRODUCTION

UDC 687

Mitrokhina T.A., Dmitrienko N.A., Cherunova I.V. Using artificial intelligence technologies in designing reconstructed garments

Mitrokhina Tatyana Alexandrovna,
1st year graduate student, Faculty of Engineering and Technology, Department of Design, Technology and Design, Institute of Service and Entrepreneurship (Branch) of DSTU in Shakhty.
Dmitrienko Nadezhda Alekseevna,
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Foreign Languages, Institute of Service and Entrepreneurship (Branch) of DSTU in Shakhty.
Cherunova Irina Viktorovna,
Doctor of Technology. Sciences, Professor, Department of Design, Technology and Design, Institute of Service and Entrepreneurship (Branch) of DSTU in Shakhty.

Abstract. *This article examines the concepts of artificial intelligence and its use in preservation, and rethinking the historical heritage of the Lower Don region of the Russian Federation, by means of designing reconstructions of garments, as an object of visual culture. A historical description of the costume of the Scythians of the 3rd-5th centuries BC is given. As a result of research, sketches of experimental prototype images of model solutions of Scythian costumes of the 3rd-5th centuries BC were developed, in the author's reading and using artificial intelligence.*

Keywords: *artificial intelligence, Russian Federation, culture, Scythian costume, design, reconstruction of a garment.*

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

The development of technology, technological progress over the years has radically changed the way of life of modern people. Incredible new tools and resources have made previously unavailable knowledge. Technological advances contribute to the dissemination of knowledge and subsequent progress, being the driving force behind a massive scientific and cognitive revolution aimed at improving the quality of human life through the dissemination of valuable innovations. This type of technology includes: robotics, additive technologies, artificial intelligence and much more.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Artificial intelligence (AI) is used in various fields of human activity. It helps to automate processes, systematize work, expand human capabilities, see the final result of research in the process of development [1].

The term "artificial intelligence" was coined by John McCarthy in 1956 at a conference at Stanford University. "Artificial intelligence is the science and engineering activity of creating intelligent machines and programs" [2]. Initially, AI was closer to mathematics than to creativity and aesthetics.Recently, AI has had the greatest impact on the field of fashion, design, design of new clothing products. Intelligent algorithms not only calculate and process large amounts of data, but also predict trends and create ready-made visual images [3].

In the modern context, the role and place of AI in human activity should be clearly distinguished. On the one hand, it is a tool that allows you to offer faster and more accurate solutions [4]. On the other hand, neural networks become "shadow" performers who completely perform work instead of a person. Whether AI will be an innovator of development or a threat to the author's identity in design, this requires an analysis of the benefits and risks of its use in design processes.

The introduction of artificial intelligence in the fashion industry, namely in the reconstruction of historical samples, brings a number of significant advantages. It allows you to increase the speed of solving tasks, while ensuring high accuracy [2]. In the creative process, AI helps to reduce the time spent on searching for fabrics, textures, and choosing a decorative solution (finish). 3D models created using AI, based on the designer's sketch, allow you to create a realistic model for virtual fitting.

Despite the advantages, the use of AI entails a number of serious risks. One of the main problems is the reliability of information transmission based on the data of existing works [4].

AI often creates distorted and inoperable models. Such generated images are beautiful, but they cannot be implemented without human refinement (for example, dresses without seams, errors in the interpretation of textures, fabric "hanging in the air," or inharmonious compounds of materials devoid of logic). The above effects are not acceptable in reconstructed suits.

The use of algorithms jeopardizes cultural values and traditional creativity, which in the future can lead to inaccurate reading of the cultural code of any ethnic group.

In the process of developing the author's collection, artificial intelligence was applied and analog and hybrid design methods were implemented. The example of working with the collection shows exactly how you can use the capabilities of modern technologies.

A feature of the modern period of the historical development of Russian society is the increased interest and great importance of national identity and self-awareness of people as part of their own culture in the world community. The key decree of the President of the

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Russian Federation for 2026 was the announcement of it as the "Year of the Unity of the Peoples of Russia" (Decree No. 78861 of 25.12.2025) in order to strengthen interethnic harmony. [5]

The Russian Federation is a multinational people united by a common destiny on their land, affirming human rights and freedoms, civil peace and harmony, preserving the historically established state unity, proceeding from the generally recognized principles of equal rights and self-determination of peoples, honoring the memory of ancestors who passed on to us love and respect for the Fatherland. [5]

The difficulty of preserving culture in an authentic form and transmitting them to future generations with maximum preservation is determined by the inevitable problems associated with the loss of many cultural objects caused by a long period of time. As a result, restoration and reconstruction technologies are of great importance, they are important for popularizing and drawing attention to cultural heritage sites. [6].

Reconstruction technologies contribute to an increase in possible sites for specialized events (exhibitions in museums, design of art spaces) for implementation with the attraction of people to disclose the content of cultural heritage objects. [7] This requires an increase in the number of objects of observation themselves, which, of course, is already beyond the capabilities of museum restoration technologies and is more related to reconstruction technologies.

As a geographical location, as an important segment among the wide variety of cultural heritage of Russia, there is a segment of territorial localization of attributes of historical eras and their characteristics in the region of the Lower Don of the Russian Federation [5]. The cultural heritage of the Lower Don in the form of various costume items represents a unique segment of subject design that requires special attention.

The creation of graphic design objects for the manufacture of model solutions for a historical costume on the example of ethnocultural societies of the Lower Don is based on a basic understanding of the location and historical features of the costume culture formed in it.

Research "concepts "Lower Don" includes the flow of the Don River from Kalach to the Taganrog Bay." It was the natural conditions of the Lower Don that largely determined the history of human settlement in ancient times. For thousands of years, geographically connected with the significant Don River, which became the center of attraction for the foundation and development of centers of trade and interaction between representatives of the Great Steppe and the Mediterranean. Important for the location of the Lower Don is that the Sea of Azov is located nearby. [3]

The basis for the development of a reconstructed version of sketches using AI, and later on the implementation of models of Scythian costumes living on the territory of the Lower Don,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

is the initial information of historical significance. As noted in many studies, the peculiarity of the Don territories and the life of the people living in it is that intercultural and interethnic ties had on the general part of the placement. Scythians were selected as the studied ethnic group.

According to one source, the Scythians are the common name for Iranian-speaking tribes related to language and culture, the origin of which has not been fully clarified. [8] Other studies claim that the Scythians are the Greek word with which the Hellenes denoted nomadic peoples living in the Black Sea between the currents of the Don and Danube rivers. The Scythians themselves called themselves Saki. [9]

The clothes of the Scythians became known from the excavations of the Scythian burial mounds. Ancient Scythians wore clothes made of leather, which were sewn with thin straps or strong threads, made of woven and felt sheep wool. Clothing was made by a woman and slaves. The men's suit consisted of a shirt, pants and a long-sleeved jacket. Pants-anaxirids (patterned pants) were embroidered or metal overlays, leather jackets of various lengths. From the front, the jacket was scented and fastened with a clasp or tied with a leather belt. Such a jacket can be considered the oldest known form of caftan. On the sleeves on top was embroidery (similar to the robes of the Byzantine emperors or Iranian-Mongolian clothes). Under the jacket was dressed shirt-kirbasia. Shoes are wide, leather half-shoes. Hats for men are pointed, cone-shaped leather or felt hats covering the back of the head and ears.

Little is known about the clothes of ancient Scythian women, the costume consisted of a dress and a top piece. In general, it was wider and richer decorated than men's clothes. The female costume was supplemented with jewelry that was actively borrowed from adjacent Greek colonies: earrings, bracelets, rings, diadem, leg bracelets, belts [10]

If we take into account the tasks and terms of reference of this project, then sewing products should be divided by seasonal and target characteristics and the filter of the applicable assortment should be preserved, taking into account everyday or ceremonial use.

In general, the types of finishes and ergonomic solutions for Scythian clothing are determined by their conditions of use and could consist of the upper lower part (shoulder and waist) which, with further detailing of various products, attributes, shoes, accessories, items and many other components of the costume images, were synthesized as part of a creative phased process.

Images of open sources of samples of the suit of Scythians of the III-V centuries BC are represented by a female suit in Figure 1, a, a male suit in Figure 1, b reflect the general shape of the clothes of the period under consideration, as well as the specifics of the image when it is completed in a suit, taking into account possible representations in color scheme, details of decoration.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

(а) (б)

Figure 1 - Samples of Scythian clothing (a - historically recreated drawings of a female costume [9], b - historically recreated drawings of a male costume)

As a result of research, analytical and creative searches, sketches of experimental prototype images of model solutions of Scythian costumes of the 3rd-5th centuries BC were developed, presented in Figure 2, a-author's sketch made in mixed graphics, in Figure 2, b-costume complex made using AI.

а) б)

Figure 2 - Copies of the costumes of the Scythians of the III-V centuries BC, (a-suit complex made using mixed equipment, b-suit complex made using AI)

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Based on the above comparison, we can say that AI in fashion (designing garments) is a tool and co-author, but it will never replace the human mind, imagination. In this work, AI acts as a tool for virtual visualization of a sketch created by the author on the basis of comprehensive work with representatives of the museum community.

Research and development of sketches was carried out within the framework of the project: "Museum Mirror of History: Diversity of Historical Costume in Ethnocultural Societies of the Lower Don" with the support of the Vladimir Potanin Charitable Foundation, the Creative Museum competition, the Museum Without Borders program on the basis of the Kamensky Museum, within the framework of grant No. GMKM-003/24 of 25.03.2024 [11].

Within the framework of a large-scale cultural project, the reconstruction of the exposition costume of the Scythians of the 3rd-5th centuries was successfully introduced. BC as a basis for a deep study of the heritage of the population of the Lower Don. The costumes are recreated with the maximum degree of historical authenticity, reflecting the features of the cut, ornament, shape and texture of the garment. The experience of forming an exposition costume demonstrates the richness and diversity of the cultural heritage of the Lower Don, allowing viewers to touch history and feel the connection of times.

People and their cultures are constantly evolving. There is no denying that the technological advances we are currently seeing are astonishing. The use of AI technology in research aimed at reconstructing costume forms opens up unprecedented opportunities associated with the study and reconstruction of a historical costume. Digitized images of paintings, engravings, archaeological artifacts describing clothes can be used as an analytical base. AI is able to recognize a coloristic solution, identify the cut, fabric structure, finish characteristic of a garment of certain ethnic groups. AI is able to transform the process of analytical work, accelerating and deepening the understanding of costume details that could previously go unnoticed, is able to quickly help with the visualization of the final product (costume pair). Experience with AI confirms that such technologies can visualize creative sketches in realism and speed up the process of finding materials and colors to create reconstructed garments of a historical costume.

References

1. Balanov, A.N. Artificial intelligence. Understanding, application and prospects: a textbook for universities/A.N. Balanov. - 3rd ed., Erased - St. Petersburg: Doe, 2026. - 312 p. - Text: immediate. ISBN 978-5-507-55902-2 Lan. Reader (Accessed on 28.02.2026)

2. Emtsev, D.I. ARTIFICIAL INTELLIGENCE, PROS AND CONS. - Text: electronic//CyberLeninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-plyusy-i-minusy/viewer (Дата обращения 28.02.2026)

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3. Demidova, M.D., Rykova E.S. Application of modern artificial intelligence technologies in the fashion industry. - Text: electronic//CyberLeninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sovremennyh-tehnologiy-iskusstvennogo-intellekta-v-industrii-mody/viewer (Дата обращения 28.02.2026)

4. Shpak, A.A., Koptseva M.S. Artificial intelligence in the art world: copyright. - Text: electronic//CyberLeninka. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-mire-iskusstva-avtorskoe-pravo/viewer (Дата обращения 28.02.2026)

5. Decree on the Year of Unity of the Peoples of Russia.– URL:

http://kremlin.ru/acts/news/78861(Дата обращения 23.04.2026)

6. Archeology of the Lower Don/Executive Editor, Doctor of History, Professor A.V. Kiyashko .//Rostov-on-Don: Southern Federal University. - 2013. - 64 s.

7. Nizhnedonskaya Cossack woman in an everyday suit with an apron "zaveska," 18 in.. - 2022 - URL: https://businka.org/uploads/images/00/ 02/48/2015/06/13/c95589.jpg (accessed date 19.01.2026).

8. Archeology opened - 2026 - URL: https ://xn--80aajhqhktebqcvc2c9e6cj.xn--p1ai/arch-cultures/(date of reference 15.04.2026).

9. The real story. Scythians. - 2017 - URL: https://hystory.mediasole.ru/skify (date of contact 15.04.2026).

10. Smirnov A.P. Scythians .//M.: 1966. 200 s

11. Mitrokhina T.A., Cherunova I.V. Preparation of the design of the exposition costume with elements of reconstruction of the forms and textures of sewing products//Sat-to works of the 11th scientific-prakt. conf. with inter. participation "Problems of the development of modern society" (January 20-21, 2026) - Kursk: KROO "VEO of Russia," 2026 (RSCI).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

MEDICAL RESEARCH AND HEALTHCARE

UDC 616.61-007.63

Budzhevich V.V. Hydronephrosis: modern approaches to diagnosis and surgical management

Гидронефроз: современные подходы к диагностике и хирургическому лечению

Budzhevich Valentina Vladimirovna
Intern surgeon
Karaganda Medical University, Kazakhstan
Будзевич Валентина Владимировна,
интерн-хирург
Карагандинский медицинский университет, Караганда, Казахстан

Abstract. *Hydronephrosis is considered a morphofunctional syndrome characterized by dilation of the renal pelvis and calyces due to impaired urine outflow. Thus, prolonged obstruction leads to increased intrapelvic pressure, impaired microcirculation, and, consequently, progressive damage to the renal parenchyma and the development of chronic kidney disease. This paper summarizes current understanding of the etiology, pathogenesis, clinical presentation, diagnosis, and, primarily, surgical treatment of hydronephrosis based on an analysis of PubMed sources (2020–2025), as well as international recommendations from the European Association of Urology and the American Urological Association. Particular attention is paid to algorithms for upper urinary tract decompression, the choice between stenting and nephrostomy, and indications for reconstructive interventions.*

Keywords: *hydronephrosis, obstructive uropathy, nephrostomy, stenting, pyeloplasty, surgery*

Аннотация. *Гидронефроз рассматривается как морфофункциональный синдром, характеризующийся дилатацией чашечно-лоханочной системы почки вследствие нарушения оттока мочи. Таким образом, длительная обструкция приводит к повышению внутрилоханочного давления, нарушению микроциркуляции и , как следствие, прогрессирующему повреждению почечной паренхимы и формированию хронической болезни почек. В работе обобщены современные представления об этиологии, патогенезе, клинике, диагностике и, преимущественно, хирургическом лечении гидронефроза на основании анализа источников PubMed (2020–2025), а также международных рекомендаций European Association of Urology и American Urological Association. Особое внимание уделено алгоритмам декомпрессии верхних мочевых путей, выбору между стентированием и нефростомией, а также показаниям к реконструктивным вмешательствам.*

Ключевые слова: *гидронефроз, обструктивная уропатия, нефростомия, стентирование, пиелопластика, хирургия*

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

Введение:

Гидронефроз рассматривается как морфофункциональный синдром, возникающий вследствие обструкции верхних мочевых путей и сопровождающийся дилатацией чашечно-лоханочной системы с последующим повреждением паренхимы почки. В основе прогрессирования лежат повышение внутрилоханочного давления,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

нарушение микроциркуляции и ишемическое повреждение нефронов с развитием интерстициального фиброза и хронической болезни почек. [Thotakura R., 2023; Nørregaard R., 2023]. Клиническая значимость гидронефроза определяется риском утраты функции почки при несвоевременном восстановлении уродинамики. Наиболее частыми причинами являются мочекаменная болезнь, стриктуры, опухоли и внешняя компрессия мочеточника [Patel K., 2020].

Цель исследования:

Анализ современных подходов к диагностике и хирургическому лечению гидронефроза.

Материалы и методы:

Проведён анализ научных публикаций, представленных в базе PubMed за 2020–2025 г., а также международных рекомендаций European Association of Urology и American Urological Association. Дополнительно использованы учебные и нормативные источники Российской Федерации и Республики Казахстан.

Основная часть:

Этиология:

Причины гидронефроза подразделяются на врождённые и приобретённые. К врождённым относят стеноз лоханочно-мочеточникового сегмента и другие аномалии развития. Приобретённые причины включают мочекаменную болезнь, опухоли, воспалительные изменения, стриктуры, а также компрессию извне [Ilgi S., 2020]

Патогенез:

Обструкция приводит к повышению давления в чашечно-лоханочной системе, компрессии сосудов, ишемии и гипоксии почечной ткани, данные процессы лежат в основе патогенеза гидронефроза. Дальнейшая активация воспалительных и профибротических механизмов приводит к постепенному развитию нефросклероза и снижению функции почки [Gembillo G., 2025].

Клиническая картина:

Клинические проявления варьируют от бессимптомного течения до выраженного болевого синдрома. Основные симптомы включают боль в поясничной области, дизурию и гематурию. В ряде случаев заболевание выявляется случайно при проведении ультразвукового исследования.

Диагностика:

Диагностика гидронефроза направлена на выявление причины, уровня обструкции и оценку функции почки. При лабораторном обследовании по общему анализу крови при гидронефрозе наблюдается воспалительный синдром, по результатам общего анализа мочи наблюдается лейкоцитурия, гематурия, а также наблюдается рост

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

креатинина. Ультразвуковое исследование является методом первичной диагностики, позволяющим выявить расширение чашечно-лоханочной системы. Компьютерная томография является наиболее информативным методом, позволяющим определить причину обструкции и степень поражения [Bingaman S., 2026]. Дополнительно применяются урография и радионуклидные методы исследования для оценки функции почки.

Согласно клиническим рекомендациям Российской Федерации от 2023гг., выделяются следующие степени гидронефроза:

1 степень – паренхима сохранена;

2 степень – незначительное повреждение паренхимы;

3 степень – значительное повреждение;

4 степень – отсутствие паренхимы, почка не функционирует.

Хирургическое лечение гидронефроза:

Принципы согласно European Association of Urology, основным принципом лечения является устранение обструкции и восстановление оттока мочи. При развитии осложнений требуется срочная декомпрессия мочевых путей - чрескожная нефростомия. Применяется при тяжёлом состоянии пациента, обструктивном пиелонефрите и анурии. Обеспечивает быстрое снижение давления и восстановление оттока мочи. К преимуществам относится быстрое снижение давления, как следствие эффективная декомпрессия. Но у данного метода есть и некоторые недостатки, как риск инфекции и наличие наружного дренажа.

Так же к вариантам лечения относится стентирование мочеточника. Стентирование мочеточника используется при стабильном состоянии пациента. Позволяет восстановить отток мочи без наружного дренажа, за счет этого пациенты испытывают меньший дискомфорт.

Выбор метода:

В случае надобности экстренной декомпресии выбор между нефростомией и стентированием зависит от тяжести состояния пациента и характера обструкции. Нефростомия предпочтительна тяжелым пациентам, стентирование мочеточника предпочтительнее для более стабильных пациентов.

Про плановых вмешательствах золотым стандартом при обструкции лоханочно-мочеточникового сегмента является пиелопластика. Варианты пиелопластики: открытая, лапароскопическая и робот-ассистированная. Наиболее распространённой является операция Anderson–Hynes, включающая резекцию суженного сегмента и формирование пиелоуретерального анастомоза.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Так же осуществляется лечение мочекаменной болезни посредством следующих методов: уретероскопия, перкутанная нефролитотомия и дистанционная литотрипсия. Выбор метода лечения мочекаменной болезни определяется размерами и локализацией конкремента: при размере до 2 см преимущественно применяется дистанционная ударно-волновая литотрипсия. При размерах более 2 см методом выбора является перкутанная нефролитотомия. Уретероскопия применяется при конкрементах мочеточника, а также при камнях почки небольшого размера, особенно при неэффективности дистанционной литотрипсии.

Согласно European Association of Urology рекомендуется органосохраняющая тактика: При сохранённой функции почки проводится реконструктивное лечение. При выраженном снижении функции (<10–15%) показана нефрэктомия.

Осложнения гидронефроза:

Гидронефроз при отсутствии своевременного лечения может приводить к развитию ряда тяжёлых осложнений, связанных как с нарушением уродинамики, так и с прогрессирующим повреждением почечной ткани. Одним из наиболее значимых осложнений является развитие хронической болезни почек, обусловленное длительной обструкцией и ишемическим повреждением паренхимы. Повышение внутрилоханочного давления приводит к компрессии сосудов, снижению перфузии и активации воспалительных и профибротических механизмов, что в итоге приводит к необратимому нефросклерозу [Gembillo G., 2025].

Не менее важным осложнением является присоединение инфекции мочевых путей. Нарушение оттока мочи создаёт благоприятные условия для бактериальной колонизации, что может приводить к развитию острого пиелонефрита. В тяжёлых случаях возможно развитие уросепсиса, представляющего угрозу для жизни пациента.

Кроме того, при выраженной обструкции возможно развитие острого повреждения почек (ОПП), особенно при двустороннем процессе или единственной функционирующей почке. Данное состояние требует экстренной декомпрессии мочевых путей.

Длительно существующий гидронефроз приводит к атрофии почечной паренхимы и снижению функции органа, что может потребовать выполнения нефрэктомии при отсутствии перспектив восстановления функции.

Обсуждение:

Современные тенденции урологии направлены на минимизацию инвазивности вмешательств при сохранении эффективности лечения. Сравнение рекомендаций European Association of Urology и American Urological Association демонстрирует единый

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

подход к необходимости декомпрессии и необходимости раннего восстановления оттока мочи, при этом выбор метода определяется клинической ситуацией.

Заключение:

Гидронефроз является значимой патологией, приводящей к хронической болезни почек при отсутствии лечения. Своевременная диагностика и ранняя декомпрессия мочевых путей позволяет предотвратить развитие хронической болезни почек и сохранить функцию органа.

References

1. Thotakura R., Anjum F. Hydronephrosis and Hydroureter // StatPearls [Internet]. — Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023. — URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK563217/

2. Rishor-Olney C.R., et al. Obstructive Uropathy // StatPearls [Internet]. — Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023. — URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/books/NBK558921/

3. Pérez-Aizpurua X., et al. Obstructive uropathy: pathogenesis and management // PMC, 2024. — URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11229834/

4. Ramakrishnan K., et al. Ureteropelvic Junction Obstruction // StatPearls [Internet]. — 2023. — URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560740/

5. Türk C., et al. Ureterolithiasis // StatPearls [Internet]. — 2023. — URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560674/

6. Obstructive Uropathy // PubMed. — 2020. — URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32644347/

7. European Association of Urology. EAU Guidelines. — 2023–2024. — URL: https://uroweb.org/guidelines

8. American Urological Association. AUA Guidelines. — URL: https://www.auanet.org/guidelines

9. Лопаткин Н.А. Урология. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. — 816 с.

10. Аляев Ю.Г. Урология. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2022. — 640 с.

11. Клинические протоколы Министерства здравоохранения Республики Казахстан. Урология. — 2020–2023.

12. Клинические рекомендации РФ— 2023

13. Gembillo G., Spadaro G., Santoro D. Link between obstructive uropathy and acute kidney injury // World Journal of Nephrology. — 2025. — Vol. 14, №1. — URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11755241/

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 576.385.5

Dzhafarov N.A., Mustafina D.D., Ischakov A.I., Vedeshkin V.M., Karyagina N.T. Current concepts of molecular mechanisms of apoptosis: cross-talk of signaling pathways and therapeutic perspectives

Современные представления о молекулярных механизмах апоптоза: перекрёстные взаимодействия сигнальных путей и терапевтические перспективы

Dzhafarov Nugman-Ali Anarovich,
2nd year student, Faculty of General Medicine, Bashkir State Medical University, Ufa
Mustafina Diana Dinarovna,
2nd year student, Faculty of General Medicine, Bashkir State Medical University, Ufa
Ischakov Azamat Insafovich,
2nd year student, Faculty of General Medicine, Bashkir State Medical University, Ufa
Vedeshkin Vedor Maksimovich,
2nd year student, Faculty of General Medicine, Bashkir State Medical University, Ufa
Karyagina Nailya Timerkhatmullovna,
Candidate of Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Biological Chemistry, Deputy Dean for Educational and Methodological Work of the Faculty of General Medicine, Bashkir State Medical University
Джафаров Нугман-Али Анарович,
студент 2 курса, лечебный факультет, ФГБОУ ВО Башкирский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Уфа
Мустафина Диана Динаровна,
студент 2 курса, лечебный факультет, ФГБОУ ВО Башкирский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Уфа
Исхаков Азамат Инсафович,
студент 2 курса, лечебный факультет, ФГБОУ ВО Башкирский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Уфа
Ведешкин Фёдор Максимович,
студент 2 курса, лечебный факультет, ФГБОУ ВО Башкирский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Уфа
Карягина Наиля Тимерхатмулловна,
кандидат наук, доцент кафедры биологической химии, заместитель декана лечебного факультета по учебно-методической работе ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет»

Abstract. *The article presents an analysis of current concepts on the molecular mechanisms of apoptosis – programmed cell death that is crucial for maintaining tissue homeostasis and the development of many diseases. The main pathways of apoptosis activation are considered: the extrinsic (receptor-mediated) and intrinsic (mitochondrial) pathways. The role of lipid mediators, primarily ceramide, in triggering proapoptotic signals through modulation of protein kinase activity and ion channels is shown. Special attention is paid to the caspase cascade as the central executive mechanism, as well as to the crosstalk between extrinsic and intrinsic pathways involving the Bid protein. The significance of ion channels, particularly potassium channels, in the regulation of membrane potential and their involvement in apoptotic signaling is highlighted. Based on the analysis, it is concluded that apoptosis is a complex integrated system combining biochemical and*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

biophysical mechanisms. Understanding these processes opens prospects for the development of targeted therapeutic approaches in cancer, autoimmune and neurodegenerative diseases.

Keywords: *apoptosis, caspases, ceramide, ion channels, mitochondrial pathway, death receptors, signal integration*

Аннотация. *В статье представлен анализ современных представлений о молекулярных механизмах апоптоза – программируемой клеточной гибели, имеющей ключевое значение для поддержания тканевого гомеостаза и развития многих заболеваний. Рассмотрены основные пути активации апоптоза: внешний (рецепторно-опосредованный) и внутренний (митохондриальный). Показана роль липидных медиаторов, прежде всего церамида, в запуске проапоптотических сигналов через модуляцию активности протеинкиназ и ионных каналов. Особое внимание уделено каспазному каскаду как центральному исполнительному механизму, а также взаимодействию внешнего и внутреннего путей с участием белка Bid. Отражено значение ионных каналов, в частности калиевых, в регуляции мембранного потенциала и их вовлечённость в апоптотическую сигнализацию. На основе проведённого анализа сделан вывод о том, что апоптоз представляет собой сложную интегрированную систему, объединяющую биохимические и биофизические механизмы. Понимание этих процессов открывает перспективы для разработки таргетных терапевтических подходов при онкологических, аутоиммунных и нейродегенеративных заболеваниях.*

Ключевые слова: *апоптоз, каспазы, церамид, ионные каналы, митохондриальный путь, рецепторы смерти, сигнальная интеграция*

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

Введение

Апоптоз представляет собой строго регулируемый процесс программируемой клеточной гибели, обеспечивающий баланс между пролиферацией и смертью клеток, необходимый для нормального функционирования тканей и предотвращения патологий. Регуляция апоптоза осуществляется на молекулярном уровне с участием сигнальных молекул, ферментов и ионных каналов.

Ключевая роль принадлежит липидным медиаторам, прежде всего церамиду — биологически активному сфинголипиду, образующемуся в ответ на стрессовые сигналы. Церамид активирует протеинкиназы (в том числе MAPK), что запускает внутриклеточные каскады, направленные на активацию генов, ответственных за апоптоз.

Ионные каналы, изменяя ионный баланс клетки, участвуют в регуляции апоптоза. Липидные медиаторы модулируют активность каналов, контролируя поток ионов (кальций, калий), что ведёт к изменению мембранного потенциала и запуску каспазного каскада. Повышение внутриклеточного кальция служит сигналом для активации протеаз, расщепляющих ключевые белки.

Центральным механизмом апоптоза является каспазный каскад — последовательная активация цистеиновых протеаз. Каспазы подразделяются на инициаторные (активируются первыми) и эффекторные (отвечают за деградацию

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

структурных и регуляторных белков). Активация каспаз контролируется двумя основными путями: внешним и внутренним.

Внешний путь инициируется связыванием лигандов с рецепторами смерти на мембране клетки, что приводит к формированию сигнального комплекса и активации каспаз-8 или -10. Внутренний путь запускается внутриклеточными стрессорами (повреждение ДНК, нарушение митохондриальной мембраны), вызывая выход проапоптотических факторов, в том числе цитохрома с, из митохондрий. Цитохром с связывается с белком апап-1, активируя каспазу-9 и последующий каспазный каскад.

Данная работа посвящена изучению взаимодействия указанных молекулярных компонентов и их влияния на активацию апоптоза. Рассматриваются механизмы модуляции ионных каналов, обеспечивающие дополнительные уровни регуляции. Особое внимание уделяется комплексной интеграции сигналов внешнего и внутреннего путей, обеспечивающей точность и эффективность программы клеточной смерти.

Полученные результаты важны для углубления понимания молекулярных механизмов апоптоза и разработки перспективных терапевтических подходов к лечению заболеваний, связанных с нарушением клеточной гибели (рак, нейродегенеративные и аутоиммунные патологии).

1.Перспективы исследования молекулярных механизмов апоптоза

Современные исследования молекулярных механизмов апоптоза направлены на выявление новых элементов регуляции, понимание междисциплинарных взаимодействий и разработку методов точного контроля этого процесса в живых организмах. Несмотря на прогресс в изучении классических путей (митохондриального и рецепторного), остаётся необходимость в более глубоком понимании динамики сигнальных сетей и тонких молекулярных взаимодействий, определяющих судьбу клетки.

Развиваются интегративные подходы, сочетающие молекулярную биологию с методами *in vivo* визуализации (ПЭТ, МРТ, флуоресцентный имиджинг), что позволяет отслеживать апоптоз в реальном времени в тканево-специфическом контексте. Активно создаются специализированные контрастные агенты для неинвазивного мониторинга клеточной гибели.

Важным направлением является изучение вариабельности апоптоза в различных клеточных типах, особенно в иммунных клетках и микроокружении опухолей. Изменения чувствительности лимфоцитов к проапоптотическим стимулам остаются в фокусе исследований.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

С терапевтической точки зрения, модификация апоптоза становится приоритетом персонализированной медицины. Использование апоптоз-модулирующих агентов (мелатонин, BH3-миметики), а также воздействие на ионные каналы и липидные медиаторы позволяют тонко настраивать клеточный ответ. Перспективны комбинированные подходы, направленные на инициацию гибели патологических клеток и преодоление резистентности к традиционной терапии.

Апоптоз представляет собой результат взаимодействия сложной сети сигналов, включающей внешние рецепторы, митохондриальные сигналы, биоэлектрические изменения мембран и транскрипционные факторы. Такой комплексный характер требует системного подхода в исследованиях и клинической практике.

2.Основы регуляции апоптоза на клеточном уровне

Апоптоз — генетически запрограммированный процесс клеточной гибели, при котором клетка распадается на апоптотические тельца, фагоцитируемые макрофагами без воспалительного ответа [4]. Этот механизм обеспечивает удаление ненужных или повреждённых клеток, поддерживая тканевой гомеостаз. Ежедневно в организме человека образуется и уничтожается десятки миллиардов клеток [1]. Морфологические изменения включают сжатие объёма, конденсацию хроматина, деструкцию ядра и фрагментацию ДНК.

Биохимически апоптоз реализуется через каспазный каскад. Инициирующие каспазы (8, 9, 10) активируют эффекторные каспазы (3, 6, 7), которые разрушают структурные и регуляторные белки клетки. Основные пути активации — рецепторный (внешний) и митохондриальный (внутренний) [3, 1].

Регуляция апоптоза осуществляется балансом про- и антиапоптотических белков семейства Bcl-2. Нарушение этого равновесия ведёт к патологиям, включая опухолевую трансформацию и лекарственную устойчивость. Апоптоз также участвует в контроле постмитотической гибели полиплоидных клеток, предотвращая геномную нестабильность [11].

3.Молекулярные липидные медиаторы в апоптозе

Церамид — центральный липидный медиатор, запускающий проапоптотические сигналы через активацию протеинкиназ (PKC, тирозинкиназ) [1, 5]. Он модифицирует активность ионных каналов, особенно калиевых (K^+). N-ацил-сфингозин, производное церамида, вызывает инактивацию K^+-каналов, предположительно через фосфорилирование тирозинкиназами [10]. Блокада K^+-каналов ведёт к деполяризации мембраны, что создаёт условия для апоптоза. Аналогичные процессы происходят на митохондриальной мембране, способствуя потере потенциала [10].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Церамид повышает внутриклеточный кальций и активные формы кислорода, усиливая проапоптотические реакции [5, 4]. Как вторичный мессенджер, он связывает активацию киназ с изменением электрофизиологических характеристик клетки. Избыточное накопление церамидов наблюдается при инсулинорезистентности и диабете 2 типа, что указывает на его роль в метаболических нарушениях [4, 2].

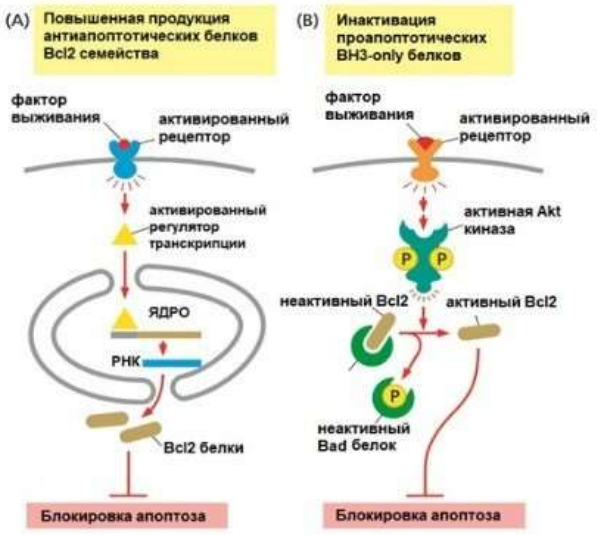


Рисунок 1 — Схемы молекулярных липидных медиаторов и путей передачи сигнала в апоптозе

4.Каспазный каскад: ключевой механизм реализации апоптоза

Каспазы — семейство цистеиновых протеаз, расщепляющих субстраты после аспартата. Они играют ключевую роль в апоптозе, а также участвуют в воспалении и некрозе [8]. Все каспазы синтезируются в неактивной форме (зимогены) и активируются в составе белковых комплексов (апоптосомы, DISC, PIDD-осомы) [1, 3].

Выделяют три группы:

1. Инициаторные каспазы (8, 9) — активируют эффекторные каспазы.
2. Эффекторные каспазы (3, 7) — расщепляют структурные и регуляторные белки (iCAD, ROCK-1, гельзолин), вызывая фрагментацию ДНК и морфологические изменения [1, 5].
3. Воспалительные каспазы — активируют провоспалительные цитокины.

Активация каспаз тесно связана с сигналами апоптоза: выход цитохрома с из митохондрий запускает апоптосому и каспазу-9, а внешние сигналы через DISC активируют каспазу-8. Каспазы расщепляют сотни белков, обеспечивая необратимую гибель клетки. Их ингибирование блокирует апоптоз, что имеет терапевтический потенциал [3].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

5.Внешний путь активации апоптоза

Внешний путь инициируется связыванием внеклеточных лигандов (FasL, TNF, Apo2L) с рецепторами смерти (CD95, TNFR1, DR3–5), имеющими цитоплазматический домен смерти (DD) [3, 4]. Тримеризация рецепторов приводит к рекрутированию адаптеров (FADD для CD95, TRADD для TNFR1) и формированию DISC (death-inducing signaling complex). DISC активирует инициаторные каспазы-8/10, которые затем запускают каспазный каскад [2, 3].

Внешний путь обеспечивает быстрый ответ, важный для иммунного надзора и удаления повреждённых клеток. В отличие от него, внутренний путь активируется внутриклеточными стрессорами и вовлекает митохондрии.

6. Внутренний (митохондриальный) путь активации апоптоза

Внутренний путь контролируется белками семейства Bcl-2, регулирующими проницаемость внешней мембраны митохондрий. Антиапоптотические белки (Bcl-2, Bcl-xL) препятствуют гибели клетки, проапоптотические (Bax, Bak) — способствуют [2]. Под действием проапоптотических сигналов активируются BH3-only белки (Bim, Puma), которые стимулируют олигомеризацию Bax/Bak и формирование пор (пермеабилизация внешней мембраны митохондрий, ПВММ) [5]. Через поры выходит цитохром c, который в цитоплазме связывается с APAF-1, формирует апоптосому и активирует каспазу-9, запуская каспазный каскад [2, 4].

Антиапоптотические белки связывают и нейтрализуют проапоптотические, предотвращая выход цитохрома c. Многие опухолевые клетки используют гиперэкспрессию Bcl-2 для выживания [7]. Селективные ингибиторы Bcl-2 (BH3-миметики, например венетоклакс) восстанавливают апоптоз в злокачественных клетках, однако резистентность остаётся проблемой [1, 3, 7].

Рисунок 2 — Схемы молекулярных компонентов и взаимодействий внутреннего (митохондриального) пути активации апоптоза

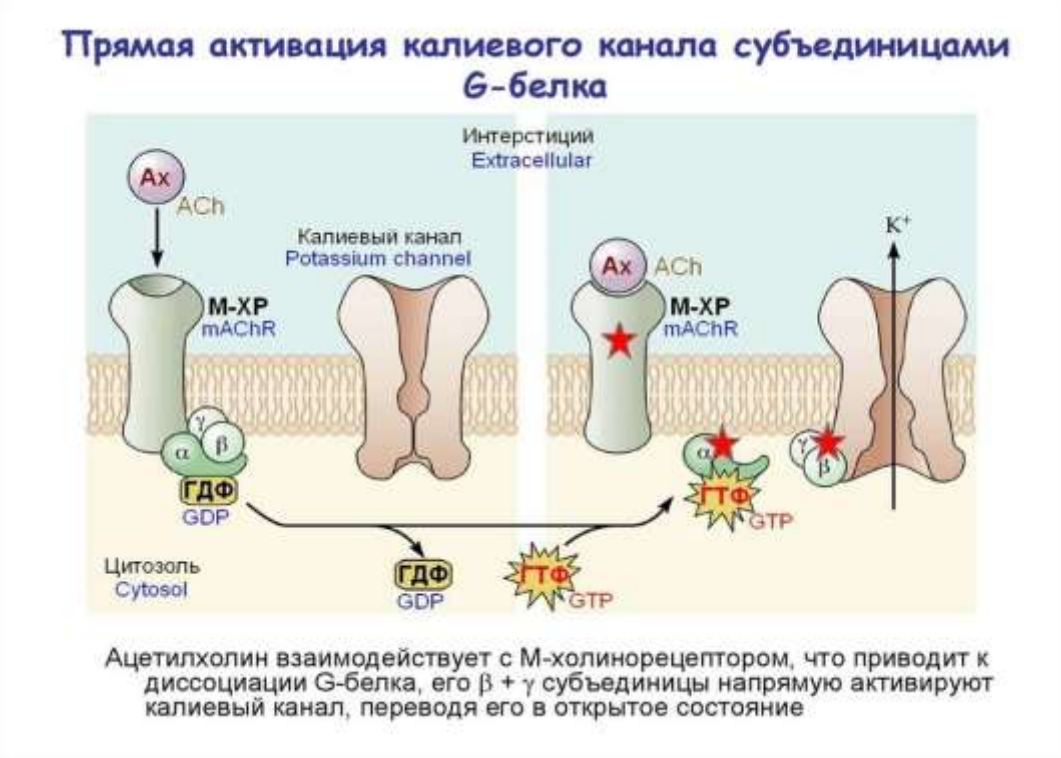
Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Следующим этапом является рассмотрение механизмов взаимодействия и координации внутреннего и внешнего путей для обеспечения комплексного и адаптивного ответа клетки на проапоптотические сигналы.

7.Модуляция ионных каналов в процессе апоптоза

Ионные каналы, особенно калиевые, модулируют мембранный потенциал и участвуют в регуляции апоптоза. Липидные медиаторы (N-ацил-сфингозин, сфингозин-1-фосфат) изменяют их функцию, обеспечивая дополнительный уровень контроля. Например, блокада калиевых каналов Kv1.3 в лимфоцитах вызывает деполяризацию и апоптоз, что перспективно при хроническом лимфолейкозе [6]. Сфингозин-1-фосфат через рецепторы S1P1–5 регулирует выживание и миграцию клеток; его модуляторы (финголимод) влияют на активность ионных каналов [12].

Изменение активности K^+-каналов ведёт к деполяризации или гиперполяризации, что служит биофизическим переключателем для апоптоза. Инактивация K^+-каналов повышает внутриклеточную концентрацию катионов, активируя каспазы [1, 2]. Модуляция ионных каналов через липидные медиаторы дополняет классические сигнальные пути и открывает возможности для таргетной терапии аутоиммунных и онкологических заболеваний [1, 3].



Ацетилхолин взаимодействует с М-холинорецептором, что приводит к диссоциации G-белка, его β + γ субъединицы напрямую активируют калиевый канал, переводя его в открытое состояние

Рисунок 3 — Схемы и описание модуляции ионных каналов в процессе апоптоза

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

8.Сигнальная интеграция: взаимодействие путей активации апоптоза

Ключевым посредником между внешним и внутренним путями является белок Bid. Каспаза-8, активированная в DISC, расщепляет Bid, и его фрагмент транслоцируется к митохондриям, вызывая высвобождение цитохрома с и усиление митохондриального пути [3, 5]. Это позволяет внешним сигналам подключать внутренний каскад.

Сигналы от рецепторов TNF-семейства могут также активировать транскрипционный фактор NF-κB, который индуцирует экспрессию ингибиторов апоптоза (IAP), создавая отрицательную обратную связь и балансируя решение клетки между смертью и выживанием [9].

Внутренний путь дополнительно регулируется фактором p53, который при повреждении ДНК стимулирует экспрессию проапоптотических белков Bcl-2, усиливая митохондриальный выход факторов смерти [1, 5]. Альтернативные механизмы, такие как гранзим B, активируют каспазы независимо от классических путей при иммунном надзоре [10].

Таким образом, интеграция сигналов на уровне прокаспаз, Bcl-2 и транскрипционных факторов обеспечивает адаптивную гибель клеток. Понимание этой сети необходимо для разработки эффективной терапии онкологических, аутоиммунных и нейродегенеративных заболеваний [1–3, 5].

Заключение

Проведённый анализ молекулярных механизмов апоптоза выявил сложное перекрёстное взаимодействие сигнальных путей. Ключевая роль липидных медиаторов, особенно церамида, заключается в активации протеинкиназ и модуляции ионных каналов, что создаёт электрофизиологические условия для запуска каспазного каскада. Каспазы, активируемые внешним (рецепторным) и внутренним (митохондриальным) путями, являются центральным исполнительным механизмом клеточной смерти. Интеграция сигналов через Bid, NF-κB и p53 обеспечивает гибкую адаптацию клетки к стрессу.

Модуляция ионных каналов липидными медиаторами дополняет традиционные сигнальные каскады, демонстрируя взаимозависимость биохимических и биофизических процессов. Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением динамики апоптоза в различных клеточных контекстах и разработкой методов избирательного воздействия на ключевые узлы сигнализации. Это имеет прямое прикладное значение для создания терапевтических стратегий при онкологических, аутоиммунных и нейродегенеративных заболеваниях.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Представленные материалы формируют научную базу для контроля жизненного цикла клетки и поддержания тканевого гомеостаза, подчёркивая необходимость системного подхода к изучению апоптоза как интегрированной системы, отвечающей за баланс между жизнью и смертью клетки.

References

1. Рыжов С.В., Новиков В.В. Молекулярные механизмы апоптотических процессов // Российский биотерапевтический журнал. 2002. Т. 1. № 3. С. 22–27.
2. Животовский Б.Д., Оррениус С. Апоптоз: биохимия и клеточная биология // Молекулярная биология. 2001. Т. 35. № 2. С. 179–189.
3. Senichkin V.V., Prokhorova E.A., Zhivotovsky B.D., Kopeina G.S. Targeting BCL-2 family proteins in cancer therapy // Biochemistry (Moscow). 2020. Vol. 85. No. 10. P. 1465–1480.
4. Шишкин А.М., Морозов С.Г., Корнева Е.А. Роль церамида в регуляции апоптоза // Биологические мембраны. 2018. Т. 35. № 4. С. 243–251.
5. Пальцев М.А., Иванов А.А. Клеточная биология: учебник. М.: Медицина, 2019. 520 с.
6. Прохорова Е.А., Животовский Б.Д., Копейна Г.С. Каспазный каскад: механизмы активации и роль в апоптозе // Успехи молекулярной онкологии. 2021. Т. 8. № 2. С. 8–19.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 616-006-047.31(470+100)

Ibatov A.D., Lebedev G.S., Pronkin N.N., Shkurenko Yu.V., Igonina M.Yu., Tsarikova S.I., Bateneva A.B., Baikalova S.S. Review on modern methods of cancer screening in the Russian Federation and foreign countries with an analysis of the prospects for the implementation of digital technologies

Обзор литературы по современным методам онкоскрининга в Российской Федерации и зарубежных странах с анализом перспектив внедрения цифровых технологий

Ibatov A.D.,
MD, Professor – I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Russian Federation (Sechenov University)
Lebedev G.S.,
Doctor of Engineering Sciences, Professor – I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Russian Federation (Sechenov University)
Pronkin N.N.,
PhD, Associate Professor – I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Russian Federation (Sechenov University)
Shkurenko Yu.V.,
Assistant – I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Russian Federation (Sechenov University)
Igonina M.Yu.,
Sixth-year student, Faculty of General Medicine – Ryazan State Medical University named after Academician I.P. Pavlova, Ministry of Health of the Russian Federation.
Tsarikova S.I.,
4th-year student – I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)
Bateneva A.B.,
2nd-year student, Master's program – National Research Tomsk State University
Baikalova S.S.,
4th-year student – I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)
Ибатов А.Д.,
д.м.н., профессор – ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)
Лебедев Г.С.,
д.т.н., профессор – ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)
Пронькин Н.Н,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

к.э.н, доцент – ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)
Шкуренко Ю.В.,
ассистент – ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)
Игонина М.Ю.,
студент, 6 курс, лечебный факультет – ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации.
Царикова С.И.,
студент, 4 курс – ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)
Батенева А.Б.,
студент, 2 курс, магистратура – Национальный исследовательский Томский государственный университет
Байкалова С.С.,
студент, 4 курс – ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)

Abstract. *Early detection of malignant neoplasms is a strategically important task that significantly increases the chances of effective treatment and reduces patient mortality, making oncoscreening one of the most urgent problems of modern medicine. Methods of molecular genetic tests, magnetic resonance imaging and positron emission tomography with computed tomography, enable cancer to be diagnosed at an early stage, when therapeutic measures can be less invasive and more effective. This article reviews modern advances in cancer screening, it also analyses the advantages and limitations of digital solutions, which are used for providing information and for initial risk assessment. We propose an innovative project combining questionnaires and artificial intelligence to increase awareness of the possibility of early cancer detection.*

Keywords: *Molecular genetic test; MRI; PET-CT; digital technology; artificial intelligence; chatbot; personalisation; oncological screening*

Аннотация. *Онкоскрининг представляет собой одну из наиболее актуальных проблем современной медицины, поскольку раннее выявление злокачественных новообразований является стратегически важной задачей, существенно повышающей шансы на эффективность лечения и снижение смертности пациентов. Методы, включающие молекулярно-генетические тесты, магнитно-резонансную томографию и позитронно-эмиссионную томографию с компьютерной томографией, позволяют диагностировать онкологические заболевания на ранних стадиях, когда терапевтические меры могут быть менее инвазивными и более результативными. В настоящей статье рассматриваются современные достижения в области онкоскрининга, а также анализируются цифровые решения, используемых для первичной оценки риска. Рассматриваются проекты, основанные на использовании анкетирования в сочетании с искусственным интеллектом, направленные на повышение информированности населения о возможности раннего выявления онкологических заболеваний.*

Ключевые слова: *Молекулярно-генетический тест; МРТ; ПЭТ-КТ; цифровые технологии; искусственный интеллект; чат-бот; персонализация; онкологический скрининг*

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

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Разработка эффективных инструментов для ранней диагностики онкологических заболеваний является одной из приоритетных задач современной медицины, что обусловлено непрерывно растущей заболеваемостью и смертностью от рака во всем мире. В связи с этим особую актуальность приобретает применение цифровых технологий для онкоскрининга, поскольку они повышают доступность профилактических мероприятий для населения. Представленное в статье приложение основано на анкетировании пользователей и направлено на выявление симптомов заболевания и подсчета риска наличия злокачественного процесса, а также оперативном информировании врача о состоянии пациента.

Цель данного обзора – рассмотреть существующие решения, позволяющие пользователям проходить скрининг максимально удобно и доступно, а врачам – оценивать риски наличия заболевания и делать прогнозы. Проведение такого рода тестирования обеспечивает своевременное реагирование на выявленную угрозу здоровью и при необходимости позволит своевременно начать терапию на самых ранних стадиях, что будет положительно влиять на успешность лечения.

В нашей статье представлен обзор преимущественно англоязычных литературных данных из PubMed и Google Scholar за период с 1999 по 2025 год, более половины источников – статьи, опубликованные за последние 5 лет. При поиске были использованы следующие ключевые слова и словосочетания: «molecular genetic test», «MRI», «PET-CT», «digital technology», «artificial intelligence», «chatbot», «personalisation».

Онкоскрининг – это диагностика для раннего выявления онкологических заболеваний, позволяющая снизить заболеваемость и смертность от рака. Раннее распознавание опухолей предупреждает развитие запущенных форм злокачественного процесса, а выявление опухоли на начальных стадиях способствуют эффективному лечению и снижению смертности. В России люди могут получить необходимую диагностику и консультацию в специализированных центрах в поликлиниках по месту жительства по направлению от лечащего врача.

Стандартный алгоритм диагностики включает опрос и осмотр пациента. Онкоскрининг проводится по следующим этапам:

1. Общий осмотр и сбор анамнеза, включая семейную историю онкологических заболеваний, наличие вредных привычек и хронических заболеваний;

2. Лабораторные и инструментальные исследования: общий анализ крови и биохимия, флюорография для скрининга рака легких, колоноскопия для выявления новообразований в толстом кишечнике. При выявлении патологии назначаются дополнительные исследования, такие как КТ или МРТ для визуализации опухолей и забор образца тканей для гистологического исследования.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3. При наличии подозрения на онкологическое заболевание, пациента направляют к соответствующим специалистам. После консультации с онкологом назначается индивидуальное лечение, после завершения которого пациент остается под наблюдением врачей.

Перечислим некоторые наиболее часто применяемые лабораторно-инструментальные методы исследования при онкоскрининге и уточнении диагноза при подозрении на онкологическую патологию.

I. Анализ крови на онкомаркеры

Онкомаркеры, или опухолевые маркеры, – это специфические молекулы, которые вырабатываются опухолевыми клетками или здоровыми клетками в ответ на опухолевый процесс. Обычно онкомаркеры – это белки, но также они могут быть представлены ферментами или гормонами или веществами другой химической природы (например альфа-фетопротеин (АФП), бета-2-микроглобулин (Б-2-МГ), простатический специфический антиген (ПСА), раковый эмбриональный антиген (РЭА), СА 125 – маркер рака яичников, СА 19-9 – углеводный антиген, используется в комплексной диагностике рака поджелудочной железы и некоторых других новообразований органов ЖКТ, антиген рака мочевого пузыря (UBC) и др.). Анализы на опухолевые маркеры могут помочь врачу получить больше информации об опухоли и определиться с тактикой лечения. Результаты исследований используются только в комплексной диагностике в сочетании с данными осмотра и визуализирующих исследований, а не отдельно. Это связано с тем, что онкомаркеры не обладают высокой специфичностью и чувствительностью, их уровень в крови может повышаться по многим другим причинам, не связанным с онкологическими заболеваниями.

II. Молекулярно-генетическое исследование

Молекулярно-генетическое исследование включает ряд лабораторных анализов, направленных на выявление специфических свойств конкретного вида опухоли [1]. Данный подход позволяет персонализировать лечение и подобрать оптимальную стратегию терапии, что может значительно улучшить прогноз для пациента [2].

Мутации играют ключевую роль в развитии злокачественных новообразований и служат важными биомаркерами для диагностики [3]. Их определение помогает выявить предрасположенность пациента к определенному виду рака или определить тип уже существующей опухоли [4].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Определить вид мутации позволяет ПЦР анализ и NGS-диагностика (new generation sequencing, секвенирование нового поколения) [5]. NGS с помощью технологии массового параллельного секвенирования позволяет единовременно установить первичную структуру множества фрагментов ДНК или РНК, что особенно актуально при лечении гетерогенных солидных опухолей и обнаружении мутаций в лейкемических клетках в условиях постоянной клональной эволюции [6].

III. Компьютерная томография (КТ)

Компьютерная томография – современный метод диагностики, используемый для получения послойных снимков с помощью рентгеновского излучения. При использовании контраста видна динамика насыщения и высвобождения раствора тканями новообразования. Метод позволяет диагностировать опухоль, а также ее отдельные очаги – метастазы. По данным снимков можно определить: локализацию, форму, размер новообразования; степень васкуляризации (разрастание новых сосудов); признаки метастазирования; степень поражения окружающих тканей, наличие компрессии и их деформации. КТ показывает малигнизированную опухоль, позволяет дифференцировать последнюю от доброкачественного процесса. На томограмме видно объемное образование, которое имеет характерные признаки: наличие перифокального отека; гиперваскуляризация; неоднородная структура с различными включениями (кальцинаты, кисты и пр.); интенсивное накопление контраста; отсутствие четких границ; инвазия опухоли; наличие метастазов в регионарных лимфатических узлах.

IV. Магнитно-резонансная томография (МРТ)

МРТ – безопасный и высокоинформативный метод визуализации опухоли, основанный на явлении ядерного магнитного резонанса [7]. Ядра атомов водорода, находясь в постоянном магнитном поле, способны к поглощению энергии, а по прекращению его действия способны испускать энергию в виде радиосигнала (резонансное выделение энергии), который фиксируется прибором и подвергается цифровой обработке [8]. МРТ позволяет обнаружить патологию на самых ранних стадиях, определить локализацию и размер опухоли, отследить наличие метастазов [9].

V. Позитронно-эмиссионная компьютерная томография (ПЭТ-КТ)

ПЭТ-КТ – гибридный метод радионуклидной диагностики, объединяющий позитронно-эмиссионную томографию и рентгеновскую компьютерную томографию [10]. Он основан на создании позитронной метки молекул веществ, активно участвующих в клеточном метаболизме. Данный способ позволяет визуализировать

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

структурные и молекулярные изменения во всем организме пациента, определить распространенность опухолевого процесса, выявить рецидив, выбрать стратегию лечения и оценить ее эффективность [11].

Во время процедуры пациент получает минимальные количества радиофармпрепарата, распределение которого в организме отражает определенные процессы [12]. Визуализация данных процессов происходит благодаря радиоактивному изотопу, излучение которого фиксирует позитронно-эмиссионный томограф [13]. 18-флюородеоксиглюкоза (^{18}FDG) является основным радиофармпрепаратом, применяемым в диагностике злокачественных новообразований [14]. При аннигиляции позитронов FDG с электронами образуются гамма-кванты, которые улавливаются детекторами ПЭТ-томографов [15]. FDG накапливается в раковых клетках, для которых свойственна большая метаболическая активность, и, в отличие от обычной глюкозы, не включается в метаболические процессы, что позволяет визуализировать очаги патологического процесса в организме [16].

VI. Эндоскопическая диагностика рака

В ходе эндоскопии в просвет органа (пищевод, кишечник, бронхи и т.д.) вводится эндоскоп, оснащенный камерой и источником света [17]. Данный метод позволяет осмотреть внутренние стенки полых органов, выявить патологические изменения в тканях (воспаление, эрозии, новообразования и др.) и при необходимости провести биопсию [18]. К наиболее востребованным процедурам относятся эзофагогастродуоденоскопия, позволяющая оценить состояние пищевода, желудка и двенадцатиперстной кишки, и колоноскопия для диагностики заболеваний толстого кишечника [19,20].

VII. Диагностика рака щитовидной железы с помощью измерения уровня экспрессии микроРНК

МикроРНК являются молекулярными маркерами, модулирующими посттранскрипционную экспрессию эукариотичеких генов, в том числе с различной онкогенетической направленностью действия [21]. Они участвуют в широком спектре процессов, играющих решающую роль в канцерогенезе, включая апоптоз, пролиферацию, дифференцировку клеток и ангиогенез [22]. Для типирования новообразований щитовидной железы возможно использование микроРНК-146b, -199B, -221, -31-5p, -375, -451a, 551b и др. [23]. Одной из конечных целей исследований является разработка панели на основе оценки количества микроРНК, циркулирующих в плазме крови [24].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Онкоскрининг в других странах.

Благодаря стремительному развитию технологий в Европе и Америке в большом количестве появились разнообразные мобильные приложения и цифровые платформы, онлайн-анкеты и чат-боты, предназначенные для оценки рисков и информирования пользователей. Однако, несмотря на очевидные преимущества, многие из этих решений имеют существенные недостатки, которые мешают их широкому и эффективному внедрению [25]. Рассмотрим некоторые из них.

Во-первых, это мобильные приложения и цифровые платформы. Например, CancerIQ (США) – это современная цифровая платформа, ориентированная на оценку наследственного риска развития онкологических заболеваний и поддержку профилактических мер [26]. Она предназначена для помощи как пациентам, так и медицинским специалистам в более точном управлении рисками и ранней диагностике [27]. Опишем её основные преимущества и недостатки. Плюсы приложения CancerIQ включают в себя персонализированный подход к оценке риска [28]. Платформа собирает и анализирует данные о семейной истории заболеваний, образе жизни и других факторах, что позволяет получать более точные и индивидуальные рекомендации. Также она способствует повышению информированности пользователей за счет предоставления образовательных материалов и рекомендаций по профилактике. Интеграция с медицинскими системами и возможностями взаимодействия с клиниками облегчает организацию профилактических программ и мониторинга состояния здоровья [29]. Для врачей платформа является инструментом для эффективной оценки риска и разработки индивидуальных планов обследования, что повышает качество медицинского обслуживания. Кроме того, приложение позволяет пользователям отслеживать изменения в своем здоровье и своевременно реагировать на потенциальные угрозы [30]. Несмотря на эти преимущества, у CancerIQ есть ряд существенных недостатков, которые значительно влияют на его эффективность и широту применения [31]. Во-первых, платформа в основном ориентирована на пациентов с высоким наследственным риском, что существенно ограничивает её универсальность и масштабируемость. Во-вторых, результаты полностью зависят от точности и полноты вводимых данных; неправильная или неполная информация может привести к ошибочным оценкам риска и, как следствие, неправомерным рекомендациям. Вопросы интеграции с национальными системами здравоохранения остаются нерешенными: отсутствие широкой поддержки со стороны государственных медицинских платформ снижает возможности масштабирования [32].

Osara Health (бывшее название CancerAid) (Австралия) предлагает научно-обоснованные анкеты для оценки вероятности развития рака, а также функции

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

отслеживания симптомов и прогресса лечения [33]. Одним из ключевых достоинств данной платформы является инновационный подход к управлению здоровьем. Приложение предоставляет пользователям персонализированные рекомендации и планы, основанные на анализе данных о состоянии здоровья [34]. Такой подход способствует более активному участию пациентов в собственном лечении и профилактике заболеваний. Удобство использования тоже является важным аспектом: интуитивно понятный интерфейс способствует легкому восприятию и навигации, что повышает мотивацию к регулярному использованию [35]. Встроенная интеграция с электронными медицинскими системами и устройствами мониторинга позволяет получать более комплексную и точную информацию о состоянии здоровья [36]. А функции отслеживания и напоминания помогают повысить приверженность планам лечения [37]. Наконец, наличие образовательных материалов способствует повышению информированности пользователей о различных аспектах здоровья. Несмотря на эти преимущества, существуют недостатки, которые требуют внимания. Одним из наиболее значимых является ограниченная функциональность без платной подписки. Многие ключевые возможности доступны только при оплате, что может стать барьером для пользователей с ограниченными финансовыми возможностями и снизить широкое распространение приложения. Также стоит отметить недостаточную локализацию и адаптацию для разных культурных и языковых групп, что снижает эффективность использования в странах, отличных от англоязычных. Вопрос конфиденциальности и безопасности персональных медицинских данных также остается актуальным: несмотря на внедренные меры защиты, использование чувствительной информации требует высокой прозрачности и ответственности со стороны разработчиков [38]. Еще одним недостатком является ограниченная интеграция с разнообразными медицинскими устройствами, что снижает точность мониторинга и эффективность системы [38].

Другой группой цифровых решений являются системы онлайн-анкетирования. Здесь, в первую очередь, следует указать OncoLink (США) – это популярная онлайн-платформа, предоставляющая обширную информацию об онкологических заболеваниях, методах диагностики, лечении и профилактике. Она служит ценным ресурсом для пациентов, их родственников и медицинских специалистов, помогая получать актуальные знания и ориентироваться в сложной сфере онкологии [39]. Среди ее преимуществ можно выделить наличие большой информационной базы, которая содержит множество статей, руководств и ресурсов, охватывающих широкий спектр вопросов, связанных с онкологическими заболеваниями. Платформа отличается доступностью для широкой аудитории, поскольку предназначена как для пациентов, так

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

и для специалистов, что делает ее универсальным источником знаний. Постоянное обновление данных позволяет ей оставаться актуальной, а интуитивно понятный интерфейс способствует легкости поиска нужной информации [40]. В дополнение, доступ к сайту возможен из любой точки мира, что особенно важно для тех, кто ищет сведения в домашних условиях или во время путешествий [41]. Однако, несмотря на эти преимущества, у OncoLink есть и существенные недостатки, которые значительно снижают ее практическую ценность. В первую очередь, платформа предоставляет универсальную информацию без учета индивидуальных особенностей каждого пациента, что затрудняет применение полученных знаний в конкретных случаях. Кроме того, отсутствует возможность взаимодействия с медицинскими специалистами через онлайн-консультации или индивидуальные рекомендации, что особенно важно при сложных или нестандартных ситуациях [41]. Еще одним недостатком является ограниченность локализации – большинство материалов ориентировано на англоязычную аудиторию, что снижает доступность для неанглоговорящих пользователей [42].

OncoSim (Канада) – это современная онлайн-платформа, предназначенная для моделирования и оценки различных сценариев лечения онкологических заболеваний [43]. Она предоставляет пользователям инструменты для анализа эффективности терапевтических подходов, прогнозирования результатов и планирования индивидуальных стратегий лечения [44]. Среди основных преимуществ платформы можно выделить наличие мощных аналитических инструментов, которые позволяют врачам и исследователям моделировать различные ситуации и принимать более обоснованные решения. Также она отличается удобным интерфейсом и возможностью интеграции с медицинскими базами данных, что облегчает работу с большой массой информации. Помимо этого, платформа часто обновляется с учетом последних научных достижений, что обеспечивает актуальность предоставляемых данных и моделей. Однако, несмотря на ряд достоинств, у OncoSim есть существенные недостатки, которые значительно ограничивают её практическую пользу и доступность [45]. В первую очередь, основная проблема заключается в сложности использования платформы для неподготовленных пользователей. Она рассчитана в основном на специалистов в области онкологии, биоинформатики и медицинских исследований, что делает её неподходящей для широкой аудитории пациентов или пользователей без специальной подготовки. Еще одним важным недостатком является ограниченность в области персонализации результатов. Несмотря на технологические возможности, многие модели и сценарии в OncoSim остаются достаточно обобщенными и не учитывают индивидуальные особенности каждого пациента, такие как генетика,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

сопутствующие заболевания или анатомо-физиологические характеристики, что снижает точность и применимость прогнозов [46]. Также платформа может страдать от недостатка данных для полноценного моделирования редких или сложных случаев, что ограничивает её эффективность в более сложных клинических ситуациях [47]. Еще одним существенным минусом является ограниченная интеграция с другими системами и электронными медицинскими картами, что усложняет автоматический обмен данными и повышает риск ошибок при ручном вводе информации.

Следующей группой цифровых решений являются чат-боты. В этой группе лидирующие позиции занимает чат-бот Cancer Chatbot [48]. Он является современным инструментом, предназначенным для предоставления информации и поддержки пациентам, борющимся с онкологическими заболеваниями [49]. Одним из его главных преимуществ является доступность: он работает круглосуточно, позволяя пользователям получать ответы на вопросы в любое время и из любой точки мира, что особенно важно для тех, кто нуждается в срочной информации или психологической поддержке. Вместе с тем, такой чат-бот способен быстро обрабатывать большое количество запросов, обеспечивая пользователю своевременную помощь и разъяснения по различным аспектам диагностики, лечения и профилактики рака. Также он может помогать в навигации по медицинской информации, напоминать о приеме лекарств, заполнять анкеты или направлять к соответствующим специалистам, что способствует эффективному управлению состоянием здоровья. Однако, у Cancer Chatbot есть и значительные минусы, которые могут ограничивать его эффективность и восприятие пользователями. Во-первых, качество предоставляемой информации полностью зависит от заложенных в него данных и алгоритмов, что может привести к ошибкам или устаревшей информации, особенно если в системе отсутствует регулярное обновление. Во-вторых, чат-бот не способен заменить личное общение с врачом или психологом, что особенно важно при сложных диагнозах или необходимости индивидуального подхода [50]. Он не может учитывать уникальные особенности каждого пациента, его эмоциональное состояние или контекст ситуации, что иногда приводит к поверхностным или неподходящим рекомендациям. Кроме того, некоторые пользователи могут испытывать трудности в использовании чат-бота из-за недостатка технических навыков или языковых барьеров, особенно из-за того, что, интерфейс неудобен или доступен только на определенном языке. Также стоит отметить, что чат-бот не способен адекватно реагировать на чрезвычайные ситуации или кризисные ситуации, например, при панике или наличии суицидальных мыслей, что требует немедленного вмешательства специалиста. Возможна проблема с доверием к автоматизированной системе, особенно у пожилых людей или тех, кто предпочитает

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

личное общение, что снижает уровень использования такого инструмента. Наконец, существует риск конфиденциальности и безопасности данных, если информация пользователей не защищена должным образом, что может привести к утечкам или неправильному использованию личных данных [51].

Чат-бот HealthBot (Австралия) в контексте современного развития цифровых технологий и телемедицины приобретает все большую популярность как инструмент для быстрого получения медицинской информации и первичной поддержки населения [52]. Однако, несмотря на очевидные преимущества, использование таких систем сопряжено с рядом существенных ограничений и рисков, что требует их критического анализа. Чат-бот HealthBot обладает рядом преимуществ, которые делают его ценным инструментом для пользователей. Во-первых, он обеспечивает круглосуточный доступ, позволяя получать необходимую информацию в любое время, что особенно актуально в экстренных ситуациях или при необходимости срочной поддержки. Во-вторых, он упрощает процесс получения медицинской информации: быстро и удобно можно ознакомиться с симптомами, профилактическими мерами и общими рекомендациями без ожидания у врача. Такой бот способен одновременно обрабатывать большое количество запросов, что снижает нагрузку на медицинский персонал и увеличивает скорость работы службы поддержки. Анонимность общения помогает убрать психологический барьер при обсуждении деликатных вопросов, способствует доверию и комфортному взаимодействию. Сверх того, HealthBot может служить инструментом повышения уровня медицинской грамотности и информированности населения о здоровье, делая информацию доступной для широкого круга пользователей [53]. Несмотря на очевидные преимущества, у чат-бота HealthBot есть значительные ограничения и недостатки [54]. Основная проблема – это ограниченность в качестве и точности предоставляемых рекомендаций, поскольку он работает на базе заложенных алгоритмов и данных, которые могут устаревать или быть неполными. Это может привести к распространению неправильной или неполной информации, что особенно опасно при серьезных симптомах или нестандартных ситуациях. Стоит отметить, что бот не способен учитывать индивидуальные особенности каждого пациента – историю болезни, сопутствующие заболевания или психологическое состояние, что снижает качество и персонализацию рекомендаций. Важный недостаток – невозможность заменить профессиональную медицинскую консультацию: при необходимости экстренной помощи или в сложных случаях бот не способен оказать полноценную помощь. Помимо этого, есть риск неправильного понимания или использования системы, особенно среди пожилых людей или мало технически подготовленных пользователей [55].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

В Российской Федерации разрабатываются аналогичные методы скрининга, включая подходы, ориентированные на выявление предрасположенности к онкологическим заболеваниям. Эти проекты находятся на разных стадиях реализации, но уже сейчас демонстрируют потенциал в повышении доступности и эффективности профилактической медицины. Например, специалистами Сеченовского университета разрабатывается программа, предназначенная для оценки риска развития онкологических заболеваний. Основой решения является анкетный опрос, доступный любому пользователю, вне зависимости от его уровня знакомства с медицинскими терминами и технологиями. В основе работы самой программы лежит использование искусственного интеллекта, который позволяет одновременно учитывать различные факторы и выявлять индивидуальный риск патологии. Такой подход может способствовать расширению возможностей ранней диагностики, особенно среди пожилых людей и жителей удалённых населённых пунктов. При создании приложения специалисты уделяют внимание простоте интерфейса: он формируется таким образом, чтобы быть понятным и удобным в использовании, без избыточной технической или медицинской терминологии. Кроме того, система будет регулярно обновляться на основе новых научных данных и клинических рекомендаций, что направлено на поддержание её актуальности и достоверности.

Обсуждение.

Полученные данные показывают, что современная система онкоскрининга успешно использует самые разные методы диагностики – от традиционных осмотров и лабораторных анализов до высокотехнологичных методов визуализации и генетического тестирования. Все они помогают выявлять рак на ранних стадиях и подбирать персонализированное лечение. Но вместе с этим возникает ряд проблем – не у всех есть возможность пройти сложные обследования, а для многих людей посещение клиник связано с долгими очередями и неудобствами. В этой ситуации внедрение цифровых технологий становится особенно актуальным. Новый подход, основанный на анкетировании и искусственном интеллекте, позволит на первом этапе сделать диагностику онкологических заболеваний более доступной пациентам и более персонализированной. Особенно важно, что такой метод не требует специальных знаний и оборудования со стороны пользователя – достаточно просто ответить на несколько вопросов. Это расширяет охват скрининга и может значительно повысить шансы на своевременное выявление заболевания. Сравнение основных преимуществ и недостатков проанализированных зарубежных систем онкоскрининга представлено в таблице.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица.

Сравнение цифровых зарубежных платформ для онкоскрининга.

Платформа / Platform	Преимущества / Advantages	Недостатки / Disadvantages
CancerIQ	1. Персонализированная оценка риска / Personalised risk assessment 2. Интеграция с медицинскими системами / Integration with medical systems 3. Образовательные материалы / Educational materials 4. Поддержка врачей в диагностике / Support for doctors in diagnosis	1. Ориентирована только на высокий наследственный риск / Focused solely on high hereditary risk 2. Зависимость от точности ввода данных / Dependence on data entry accuracy 3. Ограниченная интеграция с государственными системами / Limited integration with government systems 4. Вопросы безопасности данных / Data security issues 5. Ориентация на рынок США / Focus on the United States market
Osara Health	1. Персонализированные рекомендации / Personalised recommendations 2. Удобный интерфейс / User-friendly interface 3. Интеграция с медицинскими устройствами / Integration with medical devices 4. Функции отслеживания лечения / Treatment tracking features 5. Образовательные материалы / Educational materials	1. Ограниченный функционал без подписки / Limited functionality without subscription 2. Недостаточная локализация / Insufficient localisation 3. Вопросы конфиденциальности данных / Data privacy issues 4. Слабая интеграция с устройствами / Poor integration with devices 5. Нехватка клинических подтверждений рекомендаций / Lack of clinical evidence for recommendations
OncoLink	1. Обширная информационная база / Extensive information base 2. Доступность для пациентов и врачей / Accessibility for patients and doctors 3. Актуальные научные данные / Up-to-date scientific data 4. Глобальная доступность / Global accessibility	1. Отсутствие персонализации / Lack of personalisation 2. Нет интерактивных инструментов / No interactive tools 3. Мало визуальных материалов / Limited visual materials 4. Ограниченная локализация (англоязычная) / Limited localisation (English language) 5. Сложная навигация / Complex navigation

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Платформа / Platform	Преимущества / Advantages	Недостатки / Disadvantages
OncoSim	1. Мощные аналитические инструменты / Powerful analytical tools 2. Интеграция с базами данных / Integration with databases 3. Актуальные научные данные / Up-to-date scientific data	1. Сложность для неподготовленных пользователей / Complexity for untrained users 2. Высокая стоимость / High cost 3. Ограниченная персонализация / Limited personalisation 4. Недостаток данных для редких случаев / Lack of data for rare cases 5. Слабая интеграция с электронными медицинскими картами / Poor integration with electronic medical records
Cancer Chatbot	1. Круглосуточная доступность / 24/7 availability 2. Быстрая обработка запросов / Fast request processing 3. Помощь в навигации по информации / Help navigating information 4. Напоминания о лечении / Treatment reminders	1. Зависимость от заложенных данных / Dependence on input data 2. Не учитывает индивидуальные особенности / Does not take individual characteristics into account 3. Языковые/технические барьеры / Language/technical barriers 4. Риски конфиденциальности / Confidentiality risks
HealthBot	1. Круглосуточная доступность / 24/7 availability 2. Упрощение получения информации / Simplification of information retrieval 3. Анонимность / Anonymity 4. Повышение медицинской грамотности / Improvement of medical literacy	1. Неточные/устаревшие рекомендации / Inaccurate/outdated recommendations 2. Отсутствие индивидуального подхода / Lack of individual approach 3. Риски безопасности данных / Data security risks 4. Зависимость пользователей от бота / User dependence on the bot

Однако важно понимать, что цифровые инструменты должны работать в комплексе с традиционной медициной. Ни один опросник не сможет полностью заменить лабораторные или инструментальные исследования, но он может стать важным инструментом, помогающим выявлять группы риска и направлять этих пациентов на более расширенную диагностику. Вместе с тем, успешное внедрение таких программ зависит от удобства интерфейса и доверия пользователей – поэтому работа над этим аспектом работы программы крайне важна. Также нельзя забывать о необходимости постоянного обновления данных и алгоритмов – медицинская наука

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

развивается, появляются новые методы и рекомендации, и система должна отражать эти изменения, чтобы оставаться эффективной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во всем мире наблюдается неуклонный рост заболеваемости раком, в то время как возраст манифестации онкологических заболеваний постоянно снижается. Эти тенденции ведут к необходимости разработки новых, более эффективных и доступных способов ранней диагностики и скрининга, а также в доработке существующих. Рассмотренные решения позволяют усовершенствовать, а также сделать понятнее и проще процесс скрининга для широкой аудитории. Также стоит отметить, что такие подходы обеспечивают возможность быстрого обмена информации между пациентом и специалистом, позволяя врачу вовремя узнавать об изменениях в состоянии здоровья больного и своевременно оказывать необходимую помощь, что несомненно будет способствовать повышению качества оказываемой медицинской помощи.

References

1. Hanahan D, Weinberg Robert A. Hallmarks of cancer: the next Generation. Cell. 2011;144(5):646-674. doi:10.1016/j.cell.2011.02.013

2. Collins FS, Varmus H. A New Initiative on Precision Medicine. New England Journal of Medicine. 2015;372(9):793-795. doi:doi.org/10.1056/nejmp1500523

3. Vogelstein B, Papadopoulos N, Velculescu VE, et al. Cancer Genome Landscapes. Science. 2013;339(6127):1546-1558. doi:10.1126/science.1235122

4. Garraway Levi A, Lander Eric S. Lessons from the Cancer Genome. Cell. 2013;153(1):17-37. doi:10.1016/j.cell.2013.03.002

5. Gilson P, Merlin JL, Harlé A. Detection of Microsatellite Instability: State of the Art and Future Applications in Circulating Tumour DNA (ctDNA). Cancers. 2021;13(7):1491. doi:10.3390/cancers13071491

6. Hou J, Fujiyoshi S, Perera IU, et al. Perspectives on Sampling and New Generation Sequencing Methods for Low-Biomass Bioaerosols in Atmospheric Environments. Journal of the Indian Institute of Science. 2023;103(3):687-697. doi:10.1007/s41745-023-00380-x

7. Pham TT, Whelan B, Oborn BM, et al. Magnetic resonance imaging (MRI) guided proton therapy: A review of the clinical challenges, potential benefits and pathway to implementation. Radiotherapy and Oncology. 2022;170:37-47. doi:10.1016/j.radonc.2022.02.031

8. E Mark Haacke. Magnetic Resonance Imaging : Physical Principles and Sequence Design. Wiley. 1999. ISBN: 978-0-471-35128-3.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

9. Liang Z, Wang Q, Liao H, et al. Artificially engineered antiferromagnetic nanoprobes for ultra-sensitive histopathological level magnetic resonance imaging. Nature Communications. 2021;12(1). doi:10.1038/s41467-021-24055-2

10. Hu Y, Liu G, Yu H, Gu J, Shi H. Diagnostic performance of total-body 18F-FDG PET/CT with fast 2-min acquisition for liver tumours: comparison with conventional PET/CT. European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2022;49(10):3538-3546. doi:10.1007/s00259-022-05772-2

11. Anzai Y, Chang CP, Rowe K, et al. Surveillance Imaging with PET/CT and CT and/or MRI for Head and Neck Cancer and Mortality: A Population-based Study. Radiology. 2023;307(2). doi:10.1148/radiol.212915

12. Kelloff GJ. Progress and Promise of FDG-PET Imaging for Cancer Patient Management and Oncologic Drug Development. Clinical Cancer Research. 2005;11(8):2785-2808. doi:10.1158/1078-0432.ccr-04-2626

13. Gambhir SS. Molecular imaging of cancer with positron emission tomography. Nature Reviews Cancer. 2002;2(9):683-693. doi:10.1038/nrc882

14. Hirata K, Tamaki N. Quantitative FDG PET Assessment for Oncology Therapy. Cancers. 2021;13(4):869. doi:10.3390/cancers13040869

15. Kim D, Yan L, Shimazoe K, et al. Demonstration of in-vivo simultaneous 3D imaging with 18F-FDG and Na131I using Compton–PET system. Scientific Reports. 2024;14(1). doi:10.1038/s41598-024-71750-3

16. Salas JR, Clark PM. SIGNALING PATHWAYS THAT DRIVE 18F-FDG ACCUMULATION IN CANCER. Journal of Nuclear Medicine. 2022;63(5):659-663. doi:10.2967/jnumed.121.262609

17. Li S, Li F, Jiao J, Wang C. Research on passive low-light-level optical fiber endoscope detection system. Optik. 2021;247:167996. doi:10.1016/j.ijleo.2021.167996

18. Bornschein J, Tran-Nguyen T, Fernandez-Esparrach G, et al. Biopsy Sampling in Upper Gastrointestinal Endoscopy: A Survey from 10 Tertiary Referral Centres Across Europe. Digestive Diseases. 2020;39(3):179-189. doi:10.1159/000511867

19. Patel NM, Kumar S. Gastric tumours. Medicine. 2024;52(3):169-173. doi:10.1016/j.mpmed.2023.12.009

20. Schottinger JE, Jensen CD, Ghai NR, et al. Association of Physician Adenoma Detection Rates With Postcolonoscopy Colorectal Cancer. JAMA. 2022;327(21):2114-2122. doi:10.1001/jama.2022.6644

21. Ruiz-Pozo VA, Cadena-Ullauri S, Guevara-Ramírez P, Elius Paz-Cruz, Tamayo-Trujillo R, Zambrano AK. Differential microRNA expression for diagnosis and prognosis of papillary thyroid cancer. Frontiers in Medicine. 2023;10. doi:10.3389/fmed.2023.1139362

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

22. Calin GA, Croce CM. MicroRNA signatures in human cancers. Nature Reviews Cancer. 2006;6(11):857-866. doi:10.1038/nrc1997

23. Hindricks G, Potpara T, Dagres N, et al. 2020 ESC Guidelines for the Diagnosis and Management of Atrial Fibrillation Developed in Collaboration with the European Association of Cardio-Thoracic Surgery (EACTS). European Heart Journal. 2020;42(5):373-498. doi:10.1093/eurheartj/ehaa612

24. Bartel D.P. (2009). MicroRNAs: target recognition and regulatory functions. Cell, 136(2), 215-233. doi: 10.1016/j.cell.2009.01.002.

25. Sim I. Mobile Devices and Health. New England Journal of Medicine. 2019;381(10):956-968. doi:10.1056/nejmra1806949

26. Yala A, Mikhael PG, Lehman C, et al. Optimizing risk-based breast cancer screening policies with reinforcement learning. Nature Medicine. 2022;28(1):136-143. doi:10.1038/s41591-021-01599-w

27. Meça, Alba, and Maaruf Ali. A comparative analysis of startups applying AI in clinical oncology. International Conference on Computing, Networking, Telecommunications & Engineering Sciences Applications (CoNTESA), IEEE. 2024:37-45. doi:10.1109/contesa64738.2024.10891291

28. Maratt JK, Imperiale TF. Using Online Colorectal Cancer Risk Calculators to Guide Screening Decision-Making. The American Journal of Medicine. 2023;136(3):308-314.e3. doi:10.1016/j.amjmed.2022.08.008

29. Bates DW, Saria S, Ohno-Machado L, Shah A, Escobar G. Big Data In Health Care: Using Analytics To Identify And Manage High-Risk And High-Cost Patients. Health Affairs. 2014;33(7):1123-1131. doi:10.1377/hlthaff.2014.0041

30. Devine KA, Viola AS, Coups EJ, Wu YP. Digital Health Interventions for Adolescent and Young Adult Cancer Survivors. JCO Clinical Cancer Informatics. 2018;(2):1-15. doi:10.1200/cci.17.00138

31. Le C, Tatunay K, Liu W, et al. Lessons learned in migrating from one commercial genetics clinical decision-making tool to another: assessment of data integrity and utilization. Genetics in Medicine Open. 2024;3:101913-101913. doi:10.1016/j.gimo.2024.101913

32. Richards S, Aziz N, Bale S, et al. Standards and guidelines for the interpretation of sequence variants: a joint consensus recommendation of the American College of Medical Genetics and Genomics and the Association for Molecular Pathology. Genetics in medicine : official journal of the American College of Medical Genetics. 2015;17(5):405-424. doi:10.1038/gim.2015.30

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

33. Goel I, Bhaskar Y, Kumar N, et al. Role of AI in empowering and redefining the oncology care landscape: perspective from a developing nation. Frontiers in Digital Health. 2025;7. doi:10.3389/fdgth.2025.1550407

34. Müller-Polyzou R, Reuter-Oppermann M, Engbert A, Schmidt R. Identifying user assistance systems for radiotherapy to increase efficiency and help saving lives. Health Systems. 2020;10(4):318-336. doi:10.1080/20476965.2020.1803148

35. Laranjo L, Dunn AG, Tong HL, et al. Conversational agents in healthcare: a systematic review. Journal of the American Medical Informatics Association. 2018;25(9). doi:10.1093/jamia/ocy072

36. Milne-Ives M, Cock C de, Lim E, et al. The Effectiveness of Artificial Intelligence Conversational Agents in Health Care: Systematic Review. Journal of Medical Internet Research. 2020;22(10):e20346. doi:10.2196/20346

37. Thomas TH, Go K, Go K, et al. Empowerment through technology: A systematic evaluation of the content and quality of mobile applications to empower individuals with cancer. International Journal of Medical Informatics. 2022;163:104782. doi:10.1016/j.ijmedinf.2022.104782

38. Tong G, Geng Q, Wang D, Liu T. Web-based decision aids for cancer clinical decisions: a systematic review and meta-analysis. Supportive Care in Cancer. 2021;29(11):6929-6941. doi:10.1007/s00520-021-06184-y

39. Sansevere ME, White JD. Quality Assessment of Online Complementary and Alternative Medicine Information Resources Relevant to Cancer. Integrative Cancer Therapies. 2021;20:153473542110660. doi:10.1177/15347354211066081

40. Zauber AG, Winawer SJ, O'Brien MJ, et al. Colonoscopic Polypectomy and Long-Term Prevention of Colorectal-Cancer Deaths. New England Journal of Medicine. 2012;366(8):687-696. doi:10.1056/nejmoa1100370

41. Townsend DW. Dual-Modality Imaging: Combining Anatomy and Function. Journal of Nuclear Medicine. 2008;49(6):938-955. doi:10.2967/jnumed.108.051276

42. Giebel GD, Speckemeier C, Abels C, et al. Problems and Barriers Related to the Use of Digital Health Applications: Scoping Review. Journal of Medical Internet Research. 2023;25(1):e43808. doi:10.2196/43808

43. Alagoz O, Nadeau C, Yong JHE, Garner R, Coldman A, Trentham-Dietz A. Comparing Canada's OncoSim-Breast model with the United States' Cancer Intervention and Surveillance Modeling Network (CISNET) breast cancer models. Health reports. 2025;36(6):3-14. doi:10.25318/82-003-x202500600001-eng

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

44. Garaszczuk R, Yong JHE, Sun Z, de Oliveira C. The Economic Burden of Cancer in Canada from a Societal Perspective. Current Oncology. 2022;29(4):2735-2748. doi:10.3390/curroncol29040223

45. Csik VP, Li M, Binder AF, Handley NR. Development of an Oncology Acute Care Risk Prediction Model. JCO Clinical Cancer Informatics. 2021;(5):266-271. doi:10.1200/cci.20.00146

46. Parikh RB, Teeple S, Navathe AS. Addressing Bias in Artificial Intelligence in Health Care. JAMA. 2019;322(24):2377. doi:10.1001/jama.2019.18058

47. Aapro M, Bossi P, Dasari A, et al. Digital health for optimal supportive care in oncology: benefits, limits, and future perspectives. Supportive Care in Cancer. 2020;28(10):4589-4612. doi:10.1007/s00520-020-05539-1

48. Chow J, Xu L. Chatbot for Healthcare and Oncology Applications Using Artificial Intelligence and Machine Learning (Preprint). JMIR Cancer. 2021;7(4). doi:10.2196/27850

49. Azam A, Naz Z, Muhammad. CancerBot: A Retrieval-Augmented Generation based Cancer Chatbot Using Large Language Models. 2024 18th International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST), IEEE. 2024:1-6. doi:10.1109/icosst64562.2024.10871155

50. Pan A, Musheyev D, Bockelman D, Loeb S, Abdo Kabarriti. Assessment of Artificial Intelligence Chatbot Responses to Top Searched Queries About Cancer. JAMA Oncology. 2023;9(10):1437–1440. doi:10.1001/jamaoncol.2023.2947

51. Webster EM, Muhammad Danyal Ahsan, Perez L, et al. Chatbot Artificial Intelligence for Genetic Cancer Risk Assessment and Counseling: A Systematic Review and Meta-Analysis. JCO Clinical Cancer Informatics. 2023;(7):e2300123. doi:10.1200/cci.23.00123

52. Jain K, Gupta S. Health-Bot: AI-Driven Textual Question Answering for Medical Applications. 2025 2nd International Conference on Computational Intelligence, Communication Technology and Networking (CICTN), IEEE. 2025:251-256. doi:10.1109/cictn64563.2025.10932465

53. Zulzilah S, Isa JR. Decoding Patient Interactions with AI-Based Virtual Health Assistants. CARAKA Indonesian Journal of Communications. 2024;5(2):180-190. doi:10.25008/caraka.v5i2.173

54. Sagstad MH, Morken NH, Lund A, Dingsør LJ, Nilsen ABV, Sorbye LM. Quantitative User Data From a Chatbot Developed for Women With Gestational Diabetes Mellitus: Observational Study. JMIR Formative Research. 2022;6(4):e28091. doi:10.2196/28091

55. Davis RJ, Ayo-Ajibola O, Lin ME, et al. Evaluation of Oropharyngeal Cancer Information from Revolutionary Artificial Intelligence Chatbot. The Laryngoscope. 2023;134(5): 2252-2257. doi:10.1002/lary.31191

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 378.147

Leus O.K., Volkova P.A. Comparative analysis of the effectiveness of traditional and distance learning formats in a medical university

Сравнительный анализ эффективности традиционного и дистанционного форматов обучения в медицинском вузе

Leus O.K.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), 2nd year student.
Volkova P.A.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), 2nd year student.
Scientific adviser:
Pronkin N.N.,
Candidate of Economics, Associate Professor – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University).
Леус О.К.
ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 2 курс.
Волкова П.А.
ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 2 курс.
Научный руководитель: Пронькин Н.Н,
к.э.н, доцент – ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет).

Abstract*.The research paper presents a comparative analysis of the effectiveness of distance and traditional learn ing formats in a medical university. Based on a survey of 30 students, the study examines teaching quality, assessment of technical conditions, student motivation, and overall satisfaction with the educational process*

Keywords*: distance learning, face-to-face learning, medical education, learning effectiveness, material comprehension, student motivation, technical conditions.*

Аннотация. *В научной работе проводится сравнительный анализ эффективности дистанционного и традиционного форматов обучения в медицинском ВУЗе. На примере анкетирования 30-ти студентов обозревается качество преподавания, оценка технических условий, мотивации студентов и общей удовлетворённости образовательным процессом.*

Ключевые слова: *дистанционное обучение, очное обучение, медицинское образование, эффективность обучения, усвоение материала, мотивация студентов, технические условия*

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

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Введение

В условиях стремительной цифровизации образования вопрос сравнительной эффективности дистанционного и традиционного (очного) форматов обучения приобретает особую значимость, особенно в такой ответственной и требовательной сфере, как медицинское образование. Теоретические дисциплины закладывают фундамент профессиональных знаний будущего врача, и от качества их освоения напрямую зависит успешность дальнейшего обучения и практической деятельности. В связи с этим настоящее исследование посвящено анализу субъективных оценок студентов медицинского вуза относительно двух форматов обучения — очного и дистанционного — с акцентом на восприятие, усвоение теоретического материала, мотивацию, удовлетворённость и выявление ключевых факторов, влияющих на образовательный процесс.

Результаты

В исследовании приняли участие 30 студентов медицинского вуза, что обеспечивает достаточную репрезентативность для выявления основных тенденций и различий в восприятии форматов обучения. Анкетирование включало вопросы, касающиеся технических условий дистанционного обучения, субъективной оценки качества преподавания, доступности материалов, мотивации, удовлетворённости и предложений по оптимизации образовательного процесса.

Технические условия дистанционного обучения

Анализ технических возможностей показал, что большинство студентов используют для дистанционного обучения ноутбук или персональный компьютер, что обеспечивает необходимый уровень комфорта и функциональности при работе с электронными ресурсами. Качество интернет-соединения является критически важным фактором для стабильности образовательного процесса. Согласно результатам опроса, 18 из 20 студентов (90%) оценивают своё интернет-соединение как хорошее или отличное. Это свидетельствует о том, что для подавляющего большинства опрошенных технические условия позволяют полноценно участвовать в дистанционном обучении, не сталкиваясь с существенными перебоями или ограничениями. Лишь незначительная часть студентов отмечает удовлетворительное качество связи, что может быть связано с индивидуальными особенностями места проживания или техническими особенностями оборудования.

Восприятие эффективности форматов обучения

Мнения студентов относительно предпочтительного формата для усвоения теоретического материала распределились следующим образом:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

- 6 студентов (20% выборки) считают очный формат более эффективным для понимания и запоминания теории;
- 2 студента (около 7%) отдают предпочтение дистанционному формату;
- 10 студентов (примерно 33%) полагают, что оба формата одинаково эффективны.

Такое распределение свидетельствует о наличии выраженного плюрализма мнений: значительная часть студентов видит преимущества как в личном взаимодействии, так и в гибкости дистанционного обучения. Это подчёркивает важность индивидуального подхода и возможности выбора оптимального формата в зависимости от личных особенностей, стиля обучения и внешних обстоятельств.

Оценка эффективности дистанционного формата обучения

Доступность учебных материалов

Одним из ключевых преимуществ дистанционного формата является высокая доступность учебных материалов. 14 из 20 студентов (70%) оценили этот аспект на 4–5 баллов по пятибалльной шкале. Студенты отмечают, что электронные материалы, записи лекций и онлайн-тесты позволяют обращаться к учебным ресурсам в любое удобное время, повторять сложные темы, готовиться к занятиям и экзаменам без привязки к расписанию. Это особенно важно для студентов, совмещающих учёбу с другими обязанностями или проживающих вдали от вуза.

Качество объяснений преподавателя

Оценка качества объяснений преподавателя при дистанционном обучении демонстрирует значительную вариативность. 5 студентов поставили максимальную оценку (5 баллов), отмечая высокий профессионализм, ясность изложения и умение заинтересовать аудиторию даже в онлайн-формате. Однако 10 студентов оценили этот аспект на 3–4 балла, указывая на такие недостатки, как «сухие лекции», недостаточная интерактивность, отсутствие живого диалога и индивидуализированного подхода. 3 студента поставили низкие оценки (1–2 балла), что связано с ощущением формальности, недостаточной вовлечённостью преподавателя и невозможностью оперативно получить разъяснения по сложным вопросам.

Возможность задать вопрос преподавателю и скорость обратной связи

Эти параметры также получили неоднозначные оценки. Возможность задать вопрос преподавателю и получить оперативный ответ — один из наиболее чувствительных аспектов дистанционного обучения. Оценки распределились от очень низких (1–2 балла у 3 студентов) до высоких (5 баллов у 5 студентов). Такая поляризация может быть обусловлена различиями в организации учебного процесса: часть студентов участвует в онлайн-лекциях с возможностью моментального

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

взаимодействия, другие же просматривают записи без обратной связи. Это подчёркивает необходимость внедрения единых стандартов коммуникации и организации регулярных онлайн-консультаций.

Сравнительный анализ усвоения материала и мотивации

Усвоение теоретического материала

Средняя оценка усвоения теоретического материала по субъективным ощущениям студентов составила:

- Очный формат: 3,67 балла;
- Дистанционный формат: 3,33 балла.

Разница в оценках свидетельствует о том, что очное обучение воспринимается как чуть более эффективное для глубокого понимания и запоминания теории. Это может быть связано с возможностью непосредственного контакта с преподавателем, мгновенной обратной связью и более высокой вовлечённостью в учебный процесс.

Мотивация к учёбе

Интересно отметить, что уровень мотивации к учёбе при дистанционном формате оказался даже выше:

- Очный формат: 3,71 балла;
- Дистанционный формат: 4,00 балла.

Это может объясняться тем, что студенты, успешно осваивающие дистанционный формат, обладают более высокой внутренней мотивацией и самодисциплиной. Гибкость расписания и возможность самостоятельно планировать учебный процесс способствуют формированию ответственного отношения к обучению.

Удовлетворённость текущим форматом

Средний балл удовлетворённости составил 3,57. Распределение по уровням:

- Высокий (>4): 35% студентов;
- Средний (3–4): 55%;
- Низкий (<3): 10%.

В целом уровень удовлетворённости можно охарактеризовать как средне-высокий, что говорит о наличии потенциала для дальнейшего совершенствования обоих форматов.

Преимущества форматов обучения (по открытым ответам)

Очное обучение

70% студентов ценят за личное взаимодействие и коммуникацию: возможность прямого общения с преподавателем, участие в практических занятиях, дисциплину и регулярность. 40% отмечают учебную атмосферу и вовлечённость, мотивацию от группы. 20% выделяют организацию и структуру занятий.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Дистанционное обучение

80% отмечают гибкость и экономию времени (отсутствие необходимости добираться до вуза). 30% — удобство просмотра лекций в записи и наличие электронных материалов. 10% — индивидуальный подход и возможность самоорганизации.

Факторы, влияющие на успеваемость

Для очного обучения ключевыми являются качество преподавания, личное общение с преподавателем, дисциплина. Для дистанционного — самоорганизация, качество интернет-соединения, технические возможности.

Предложения студентов по оптимизации

Студенты предлагают:

- оптимизировать расписание и структуру занятий (~40%);
- расширить и улучшить цифровые материалы (~50%);
- повысить качество преподавания и интерактивность (~30%);
- индивидуализировать обучение и повысить доступность (~20%).

Выводы

1. Очный формат предпочтительнее для понимания теории, но дистанционный выигрывает по мотивации.
2. Доступность материалов — сильная сторона дистанционного обучения; качество объяснений и обратная связь требуют улучшения.
3. Смешанный формат наиболее популярен, что отражает потребность в балансе между личным взаимодействием и гибкостью.

Практические рекомендации

1. Усилить практическую составляющую дистанционного обучения (симуляции, кейсы).
2. Разработать стандартизированные краткие конспекты для дистанционных лекций.
3. Повысить оперативность обратной связи и доступность преподавателей.
4. Оптимизировать расписание с учётом индивидуальных потребностей студентов.
5. Повысить качество интерактивности и вовлечённости в дистанционных лекциях.

Заключение

Исследование показало, что оба формата обладают как сильными, так и слабыми сторонами. Оптимальным решением для медицинского образования является

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

сочетание элементов очного и дистанционного обучения с учётом индивидуальных потребностей студентов и специфики дисциплин.

References

1. Academic Medicine. Means B. et al. Evaluation of online vs traditional learning. 2013.
2. Advances in Medical Education and Practice. Comparative effectiveness of online vs classroom teaching. 2021.
3. BMC Medical Education. Pei L., Wu H. Does online learning work better than offline learning? 2019.
4. Cochrane Collaboration. E-learning for health professionals: systematic review. Cochrane Database, 2019.
5. Computers & Education. Digital learning environments and student outcomes. 2020.
6. Educational Technology Research and Development. Blended learning effectiveness. 2019.
7. EDUCAUSE. Horizon Report: Teaching and Learning Edition. 2021.
8. Frontiers in Education. Student satisfaction in online medical learning. 2022.
9. JMIR Medical Education. Impact of COVID-19 on medical education. 2020.
10. John Dewey. Experience and Education. New York, 1938.
11. Lev Vygotsky. Мышление и речь. — M., 1934.
12. Medical Education Online. Transition to online learning in medical universities. 2021.
13. Medical Teacher. Cook D.A. et al. Internet-based learning in the health professions. 2008.
14. Organisation for Economic Co-operation and Development. The State of School Education: One Year into the COVID Pandemic. Paris, 2021.
15. The Lancet. Frenk J. et al. Health professionals for a new century. The Lancet, 2010.
16. UNESCO. Education in a post-COVID world: Nine ideas for public action. Paris, 2020.
17. World Health Organization. WHO guideline: recommendations on digital interventions for health system strengthening. Geneva, 2019.
18. Министерство здравоохранения Российской Федерации. Методические рекомендации по обучению в медицинских вузах, 2022.
19. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Отчёты о цифровизации высшего образования, 2021–2023.
20. Российская академия образования. Цифровая трансформация образования, 2020.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

PHYSICAL SCIENCES

UDC 519.63

Ulzi Uyanga, Bayaraa Taigyntuya. Finite element-based self-consistent formulation of the nonequilibrium green's function method for modeling quantum ballistic transport

Ulzi Uyanga,
Bayaraa Taigyntuya
Mongolia, Ulaanbaatar, MUST, School of Applied Sciences, Department of Mathematics

Abstract. *In this paper, we develop a computational strategy for analyzing nanoscale quantum transport under ballistic conditions by integrating a Green's function-based transport formalism with a spatial discretization method suitable for electrostatic modeling. The proposed method leverages the nonequilibrium Green's function (NEGF) approach to describe carrier behavior at the quantum level, while a mesh-based numerical scheme-specifically, the finite element technique is employed to solve the Poisson equation. This hybrid formulation enables accurate treatment of complex device geometries and naturally incorporates electrostatic boundary conditions without introducing artificial constraints. The simulation domain is based on a double-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET), chosen to represent modern transistor structures. Key electronic properties, including the retarded Green's function, local carrier density, electrostatic potential distribution, and energy-resolved transmission, are computed self-consistently. To achieve convergence between the charge and potential profiles, the Newton-Raphson method is utilized. The numerical results demonstrate how potential distribution and quantum transport characteristics evolve across iterations and under different biasing conditions. In particular, the transmission spectrum and integrated Fermi functions provide insight into quantum tunneling and carrier injection phenomena in short-channel devices. These findings highlight the importance of coupled electrostatic-transport modeling in predicting quantum-scale device behavior and support the further development of simulation tools for next-generation semiconductor technologies.*

Keywords: *quantum-scale simulation, Green's function transport model, mesh-based electrostatics, self-consistent computation, advanced transistor modeling*

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

INTRODUCTION

As transistor dimensions continue to shrink into the nanometer regime, the demand for accurate simulation tools capable of handling quantum effects at this scale has significantly increased. This study focuses on modeling ballistic electron transport in a double-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) using the nonequilibrium Green's function (NEGF) framework [1], [2]. The NEGF approach provides a general and powerful method for investigating quantum transport phenomena in nanoscale devices.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Although the Schrödinger equation serves as the foundational equation for quantum transport theory, solving it directly for many-body systems remains a major computational challenge. To overcome this, various methods have been developed-among which, the Green's function formalism is particularly well-suited for nanoelectronic applications. The NEGF method, widely used in quantum device simulations, was originally developed in the 1960s by researchers including Martin, Schwinger, Kadanoff, Baym, and Keldysh [3],[4].

Traditional formulations of NEGF are rooted in many-body perturbation theory (MBPT), which requires a deep understanding of advanced quantum mechanics. However, in this work, we adopt a simplified version of the formalism introduced by Supruyo Datta and others,

which emphasizes physical intuition over mathematical complexity.

The core of the NEGF method involves a self-consistent loop between the electrostatic (Poisson) equation and the quantum transport equation. The transport equation yields the electron density corresponding to a given potential, while the Poisson equation updates the electrostatic potential based on that density. These equations are iteratively solved until both quantities reach mutual convergence. To efficiently handle the two-dimensional device structure, an uncoupled mode space approximation is employed.

In this work, we implement a self-consistent numerical approach to model quantum transport, consisting of iterative steps described as follows:

1. Starting with an initial guess for the electrostatic potential, the Schrödinger equation is solved along the confinement direction to extract quantized subband energy levels.
2. These subband energies are then utilized to form the Hamiltonian matrix governing the transport characteristics of the device.
3. Using the constructed Hamiltonian, we compute the retarded Green's function, which in turn enables the evaluation of electron density and current flowing through the device terminals.
4. The calculated carrier density is then fed into the Poisson equation to update the potential profile, completing one iteration of the self-consistency loop.

Unlike prior works that commonly apply finite difference techniques for numerical discretization, this study adopts the finite element method (FEM). FEM provides notable advantages, such as its adaptability to irregular geometries and the ease of handling diverse boundary conditions. These features are particularly beneficial in quantum device simulations, where precise boundary representation is crucial.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

In our Poisson equation formulation, homogeneous Neumann boundary conditions are imposed at both source and drain terminals. A notable strength of FEM is that it naturally accommodates such boundary conditions-often referred to as floating boundaries-without requiring additional modifications or constraints in the model.

The simulation outputs include the self-consistently computed electrostatic potential, spatially resolved carrier density, and the integrated Fermi-Dirac distribution at the contacts.

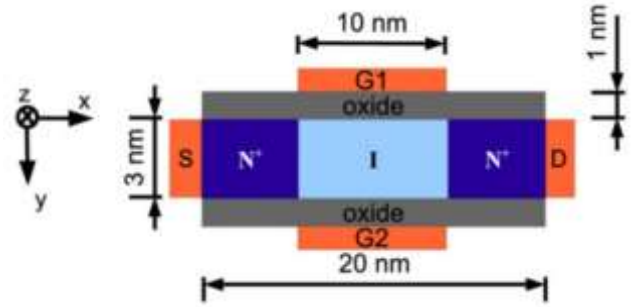


Figure 1: Geometry of the simulated double-gate MOSFET (adapted from Kurniawan, 2009)

The structure under investigation is a 2D double-gate MOSFET, chosen as the representative domain for simulation. The channel comprises source and drains regions, each 5 nm in length, separated by a 10 nm gate region. The layout, including the two gates, is shown in Figure 1.

I. THE NON-EQUILIBRIUM GREEN'S FUNCTION FORMALISM

We begin with the three-dimensional, time-independent Schrödinger equation:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*}\nabla^2\Psi(x,y,z)+\hat{U}\Psi(x,y,z)=E\Psi(x,y,z) \qquad (1)$$

Here, E denotes the eigenvalue of the Hamiltonian, $\Psi(x,y,z)$ is the quantum mechanical wavefunction, and $\hbar$ is the reduced Planck constant.

Assuming that the wavefunction behaves as a plane wave along the z-axis, i.e., $\Psi(x,y,z)=C\Phi(x,y)e^{ik_z z}$, we arrive at a reduced equation:

$$\begin{aligned}&-\frac{\hbar^2}{2m_x^*}\frac{\partial^2\Phi(x,y)}{\partial x^2}-\frac{\hbar^2}{2m_y^*}\frac{\partial^2\Phi(x,y)}{\partial y^2}+U(x,y)\Phi(x,y)\\&=\left(E-E_{k_z}\right)\Phi(x,y) \qquad (2)\\&=E_1\Phi(x,y)\end{aligned}$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

where E_1 is the transverse energy component, and E_{k_2} corresponds to the kinetic energy along z. The variables m_x^* and m_y^* are the effective masses along x and y, respectively, and U(x, y) represents the potential energy landscape in the transverse plane [10].

To proceed, we express $\Phi(x,y)$ as a superposition of mode (or subband) functions:

$$\Phi(x,y) = \sum_n \phi^n(x)\xi^n(y;x) \qquad (3)$$

Each term $\xi^n(y,x)$ solves the Schrödinger equation in a transverse slice at a fixed $x = x_0$

$$-\frac{\hbar^2}{2m_y^*}\frac{d^2\xi^n(y;x_0)}{dy^2} + U(y;x_0)\xi^n(y;x_0) = E_{\text{sub}}^n(x_0)\xi^n(y;x_0) \qquad (4)$$

Substituting (3) into (4), multiplying through by $\xi^m(y,x)$, and integrating over y, we apply the uncoupled mode approximation-assuming the mode shapes remain unchanged across x and do not interact [6] and obtain the 1D Schrödinger equation in the transport direction:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_x^*}\frac{d^2\phi^m(x)}{dx^2} + E_{\text{sub}}^m(x)\phi^m(x) = E_1\phi^m(x) \qquad (5)$$

where $E_{\text{sub}}^m(x)$ is the energy associated with the m^{th} mode along x, determined from (4).

For a fixed mode and energy E, the retarded Green's function is formulated as:

$$G^m(E) = \left(ES^m - H_{mm} - \Sigma_S^m(E) - \Sigma_D^m(E)\right)^{-1} \qquad (6)$$

Here, H_{mm} and S^m are the mode Hamiltonian and overlap matrices, respectively. $\Sigma_S^m(E)$ and $\Sigma_D^m(E)$ are self-energy matrices capturing interactions with the source and drain terminals. In the absence of scattering (ballistic regime), these self-energies are computed from boundary contributions in the variational formulation [7].

Using the finite element method (FEM), the Hamiltonian matrix elements are computed via:

$$H_{ij} = \int\left(\alpha\frac{\partial N_i}{\partial k}\frac{\partial N_j}{\partial k} + \beta N_i N_j\right)dk \qquad (7)$$

and the corresponding elements of the overlap matrix are given by:

$$S_{ij} = \int\left(N_i N_j\right)dk \qquad (8)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Here, N_i and N_j denote the FEM basis functions. The integration variable dk is either dx or dy, depending on context. The coefficients α and β vary with the Hamiltonian under consideration:

$$\alpha = \frac{\hbar^2}{2m_y^*}, \beta = U \qquad (9)$$

$$\alpha = \frac{\hbar^2}{2m_x^*}, \beta = E_{\text{sub}}^m \qquad (10)$$

To compute carrier statistics, the spectral density matrix from contact L is defined as:

$$A_L^m(E) = G^m(E)\Gamma_L^m(E)G^{m\dagger}(E) \qquad (11)$$

with the broadening matrix

$$\Gamma_L^m(E) = i\left(\Sigma_L^m(E) - \Sigma_L^{m^\dagger}(E)\right) \qquad (12)$$

The 1D carrier density is derived by integrating over energy and considering contributions from both contacts:

$$n_{1D}^m(x) = \frac{1}{\pi h_x}\int_{-\infty}^{\infty}\left(f_S(\mu_S - E)A_S^m(E)S^m + f_D(\mu_D - E)A_D^m(E)S^m\right)dE$$

Here, μ_S and μ_D are the source and drain chemical potentials, and h_x is the spatial discretization step in x. The distribution function accounting for longitudinal integration is:

$$f_{1D}(\mu, E) = 2\left(\frac{2m_z^* k_B T}{\pi\hbar^2}\right)^{1/2} \mathrm{F}_{-1/2}\left(\frac{\mu - E}{k_B T}\right)$$

The 2D density is reconstructed as:

$$n_{2D}^m(x,y) = n_{1D}^m\left|\xi^m(y;x)\right|^2$$

Transmission probability through the channel is:

$$T^m(E) = \mathrm{Trace}\left(\Gamma_S^m(E)G^m(E)\Gamma_D^m(E)G^{m^\dagger}(E)\right)$$

The distribution of electron density within the device is inherently linked to the electrostatic potential V. To determine the potential profile, we employ a self-consistent approach by coupling it with the Poisson equation:

$$\nabla\cdot(\varepsilon_r\nabla V) = -\frac{q}{T_0}(N_D^+ - n_{2D})$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

The formulation of the self-energy matrix, derived via the finite element method, can be found in [7]:

$$\left[\Sigma_L\right]_{ij} = -\frac{\hbar^2}{2m_L^*} ik_L \delta_{i\in\gamma_L} \delta_{j\in\gamma_L} \qquad (13)$$

Here, the index L LLL refers to the contact region-either the source or the drain-while γ_j denotes nodes situated at the boundary between the contact and the active device region. The wavevector k_L is obtained from the dispersion relation:

$$E - E_{\text{sub}}^m(j) = \frac{\hbar^2 k_L^2}{2m_L^*}. \qquad (14)$$

2.1. Nonlinear Poisson Equation

For an n -type semiconductor, the electrostatic potential V is governed by the following form of the Poisson equation:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla V) = -\frac{q}{\mathrm{T}_0}(N_D^+ - n_{2D})$$

Here, $V = -U/q$ with U denoting the potential energy in joules and qqq representing the elementary charge. Here, N_D^+ corresponds to the concentration of ionized donor impurities, ε_r is the relative permittivity of the material, and ε_0 is the vacuum permittivity.

The electrostatic potential and carrier density are computed in a mutually consistent manner. The nonlinear Poisson equation is addressed using the method outlined in [9], which applies the Newton-Raphson iterative scheme to achieve convergence.

Following the computation of the electron density, the quasi-Fermi level is subsequently evaluated.

$$F_n = U_{\text{old}} + k_B T \mathrm{F}_{1/2}^{-1}\left(\frac{n_{2D}}{N_C}\right)$$

where n_{2D} denotes the two-dimensional carrier concentration and N_C represents the effective density of states in the conduction band. The function $\mathrm{F}_{1/2}^{-1}$ refers to the inverse of the complete Fermi-Dirac integral of order 1/2, as detailed in [10].

The electron density can also be expressed in terms of the quasi-Fermi level via:

$$n_{2D} = N_C \mathrm{F}_{1/2}\left(\frac{F_n - U_{new}}{k_B T}\right).$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Upon determining F_n, it is incorporated into the nonlinear Poisson formulation:

$$-\nabla\cdot\left(\mathrm{T}_r\nabla U_{\text{new}}\right)=\frac{q^2N_C}{\mathrm{T}_0}\left(\mathrm{F}_{1/2}\left(\frac{F_n-U_{\text{new}}}{k_BT}\right)-\frac{N_D^+}{N_C}\right),$$

where $\mathrm{F}_{1/2}$ is again the complete Fermi-Dirac integral of order 1/2, as described in [15].

In order to formulate the linearized system required for the Newton-Raphson iteration, we begin by applying the finite element method (FEM) to discretize the nonlinear Poisson equation. The weak (variational) form of the governing equation is given by:

$$\int_\Omega\left[-\nabla\cdot\left(\mathrm{T}_r\nabla u\right)v-\frac{q^2N_C}{\mathrm{T}_0}\left(\mathrm{F}_{1/2}\left(\frac{F_n-u}{k_BT}\right)-\frac{N_D^+}{N_C}\right)v\right]d\Omega=0.$$

To proceed, we employ piecewise linear basis functions to approximate the electrostatic potential. Using the standard Galerkin approach, we let

$$u=\sum_{j=1}^{N}U_jN_j\ \text{and}\ v=N_i$$

which leads to a set of nonlinear algebraic equations for the coefficients $U_1,...,U_N$:

$$f_i\left(U_1,\ldots,U_N\right)=\int_\Omega-\nabla\cdot\left(\mathrm{T}_r\nabla\left(\sum_{j=1}^{N}U_jN_j\right)\right)N_i-$$

$$\frac{q^2N_C}{\mathrm{T}_0}\left(\mathrm{F}_{1/2}\left(\frac{F_n-\sum_{s=1}^{N}U_sN_s}{k_BT}\right)-\frac{N_D^+}{N_C}\right)N_i\,d\Omega=0,$$

for each $i=1,...,N.$.

To solve this nonlinear system, we employ the Newton-Raphson method, which at the k-th iteration yields the linear system:

$$\sum_{j=1}^{N}\frac{\partial}{\partial U_j}f_i\left(U_1^k,\ldots,U_N^k\right)\delta U_j=-f_i\left(U_1^k,\ldots,U_N^k\right),$$

for $i=1,\ldots,N,$ followed by the update rule:

$$U_j^{k+1}=U_j^k+w\delta U_j,\ \ j=1,\ldots,N$$

where $w\in[0,1]$ is a damping factor chosen to enhance convergence.

The Jacobian matrix entries, $\frac{\partial f_i}{\partial U_j}$, are given by:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$\frac{\partial f_i}{\partial U_j} = \int_{\Omega} \left[\tau_r \nabla N_j \cdot \nabla N_i + \frac{q^2 N_C}{\tau_0 k_B T} \mathrm{F}_{-1/2} \left(\frac{F_n - u^k}{k_B T} \right) N_j N_i \right] d\Omega$$

Here, we utilize the identity that governs the derivative of the Fermi-Dirac integral of order k:

$$\frac{d}{dx} \mathrm{F}_k(x) = \mathrm{F}_{k-1}(x).$$

to compute the nonlinearity's contribution to the Jacobian.

Boundary Conditions: At the gate interface, the electrostatic potential is related to the applied gate voltage by the expression:

$$V_G = -V_G + \Phi_G - \psi_{\mathrm{Si}} \qquad (15)$$

Here, V_G denotes the gate bias, Φ_G is the metal work function of the gate electrode, and ψ_{Si} corresponds to the electron affinity of silicon.

At the source and drain terminals, electrically insulating (homogeneous Neumann) boundary conditions are assumed:

$$\frac{\partial V}{\partial n} = 0 \qquad (16)$$

This Neumann-type condition, implying zero normal electric field, is similarly enforced on all remaining boundaries of the simulation domain.

IV. RESULT

The computational domain employed in the simulation is illustrated in Figure 1. A uniform grid resolution of 0.25 nm was utilized along the horizontal x axis, and 0.1 nm along the vertical y axis. The silicon body was modeled with a relative permittivity of 11.7, while the dielectric constant for the oxide region was taken as 3.9.

Concerning electrostatic boundary conditions, the electron affinity of the silicon was assumed to be 4.05 eV, and the metal work function of the two gate electrodes was taken as 4.25 eV. The doping concentration in the source and drain regions was set to $1\times10^{20} cm^{-3}$, while in the channel region, it was reduced to$1\times10^{16} cm^{-3}$.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

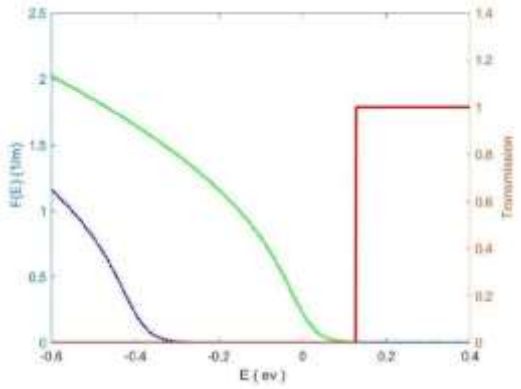


Figure 2: (a) Integrated Fermi functions and transmission coefficient – Iteration 1.

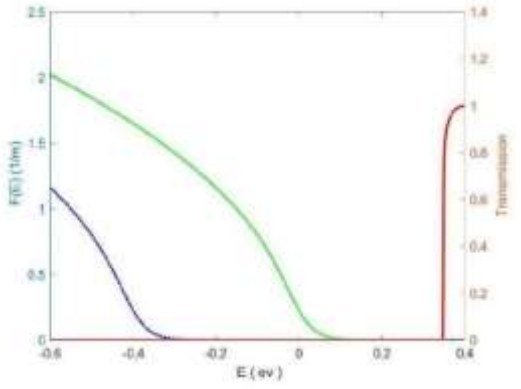


Figure 2: (b) Same quantities at Iteration 10.

In this study, we adopt bulk silicon values for the effective mass: $m_x^* = 0.98m_0$, $m_y^* = 0.18m_0$, and $m_z^* = 1m_0$.

When computing the sub band energy E_{sub}^m, it is assumed that the conduction band edge in the oxide lies 3.34 eV above that of silicon.

Symmetric biasing is applied to the gate electrodes. The source terminal is grounded, implying its electrochemical potential is set to 0 eV, while the drain is biased at 0.4 V.

In Figure 2(a), the integrated Fermi distributions and the transmission coefficient are shown for the condition $V_G = 0.4V, V_D = 0.4V$.

Since the source voltage is fixed, the corresponding Fermi function remains unchanged across iterations. In contrast, the Fermi function at the drain shifts by the drain bias. If $V_D = 0V$, the two Fermi integrals would coincide. In Figure 2(b), the transmission profile exhibits an onset near 0.34 eV, indicating that the tunneling probability remains negligible at early iterations.

Figure 3 presents the evolution of the 2D electron density across iterations for $V_G = 0.4V$, $V_D = 0.4V$. Electron density is observed to vanish at the oxide boundaries, consistent with the imposed boundary conditions. Initially, as shown in Figure 3(a), the potential is uniform, resulting in a relatively flat density profile. In contrast, Figure 3(b) demonstrates that the electron concentration near the source and drain regions has evolved to reflect electrostatic non-uniformities arising from the applied bias.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

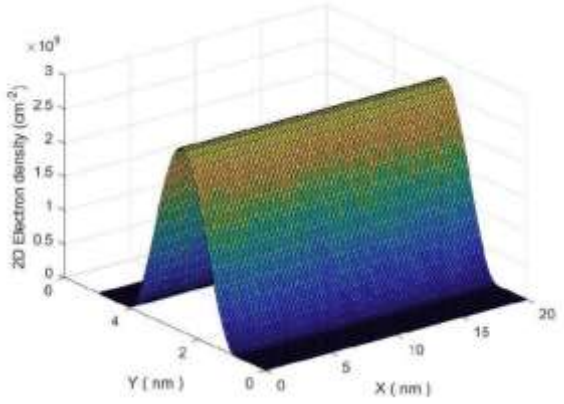


Figure 3: (a) 2D electron density $n_{2D}(x,y)$ -Iteration 1.

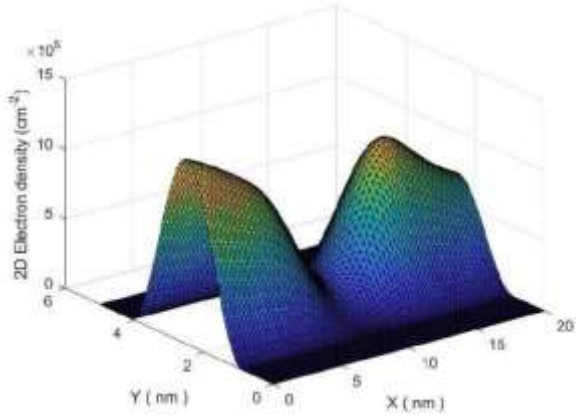


Figure 3: (b) $n_{2D}(x,y)$ at Iteration 10.

IV. CONCLUSION

This study presents a comprehensive simulation framework that integrates the Nonequilibrium Green's Function (NEGF) formalism with the Finite Element Method (FEM) to obtain a self-consistent solution for nanoscale device modeling. An uncoupled mode-space approach is employed to compute the retarded Green's function, which is subsequently utilized to evaluate the electron density. The resulting electron density is then incorporated into the Poisson equation to determine the electrostatic potential distribution.

The nonlinear Poisson equation is solved using the Newton–Raphson iterative scheme, with the computational domain discretized via piecewise linear elements within the FEM framework. Key quantities extracted from the simulation include the spatial distribution of electron density, integrated Fermi levels, and the transmission spectrum.

The obtained results exhibit deviations from the expected physical behavior, indicating limitations in the current modeling approach. These discrepancies suggest the necessity for further refinement of the simulation framework. Future work will focus on improving model fidelity through the optimization of boundary conditions, revision of material parameters, and the implementation of more robust numerical schemes to enhance convergence and predictive accuracy.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. S. Datta, Nanoscale device modeling: the green's function method, Superlattices and microstructures 28 (4) (2000) 253-278.

2. S. Datta, Quantum transport: atom to transistor, Cambridge university press, 2005.

3. L. P. Kadanoff, G. Baym, Q. S. Mechanics, Green's function methods in equilibrium and nonequilibrium problems, Quantum Statistical Mechanics (1962).

4. L. V. Keldysh, et al., Diagram technique for nonequilibrium processes, Sov. Phys. JETP 20 (4) (1965) 1018-1026.

5. R. Venugopal, Z. Ren, S. Datta, M. S. Lundstrom, D. Jovanovic, Simulating quantum transport in nanoscale transistors: Real versus modespace approaches, Journal of Applied physics 92 (7) (2002) 3730-3739.

6. E. Polizzi, S. Datta, Multidimensional nanoscale device modeling: the finite element method applied to the non-equilibrium green's function formalism, in: 2003 Third IEEE Conference on Nanotechnology, 2003. IEEE-NANO 2003., Vol. 1, IEEE, 2003, pp. 40-43.

7. J.-M. Jin, The finite element method in electromagnetics, John Wiley \& Sons, 2015.

8. Z. Ren, Nanoscale mosfets: Physics, simulation and design, Ph.D. thesis, Purdue University (2001).

9. , S. Datta, M. S. Lundstrom, nanomos 2.5: A two-dimensional simulator for quantum transport in doublegate mosfets, IEEE Transactions on Electron Devices 50 (9) (2003) 1914-1925

10. H. Jiang, S. Shao, W. Cai, P. Zhang, Boundary treatments in non-equilibrium green's function (negf) methods for quantum transport in nano-mosfets, Journal of Computational Physics 227 (13) (2008) 6553-6573. ange/13616-fermi}

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 674.214

Askarbek M.J., Kurmanbekova E.B. Development of an energy-efficient wooden window unit made of three-layer glued laminated timber with an integrated XPS thermal insulation insert

Разработка энергоэффективного деревянного оконного блока из трехслойного клееного бруса с интегрированной теплоизоляционной вставкой XPS

Askarbek Madina Jarkynbekkyzy,
Master's student, International Educational Corporation, Kazakhstan, Almaty
Kurmanbekova Elmira Bazarbaevna,
Associate Professor, International Educational Corporation, Kazakhstan, Almaty
Аскарбек Мадина Жаркынбеккызы,
магистрант, Международная образовательная корпорация, Казахстан, г. Алматы
Курманбекова Эльмира Базарбаевна,
ассоциированный профессор, Международная образовательная корпорация,
Казахстан, г. Алматы

Abstract. *An effective approach to improving the energy efficiency of window units based on laminated timber with an integrated XPS thermal insulation insert and a triple-glazed unit has been developed. The use of laminated timber increases the strength and dimensional stability of the frame, while the integrated thermal insulation insert reduces heat loss by reducing the thermal conductivity of the profile. It is known that the thermal insulation properties of window structures depend not only on the characteristics of the insulating glass unit but also on the material of the frame profiles, their geometry, and the adhesion quality of the layers. In wooden window units, strength and durability are achieved through the use of laminated timber, but the overall energy efficiency of the structure is determined by the interaction between the thermal insulation insert and the frame profile. Research has shown that the use of the XPS insert significantly reduces thermal conductivity and creates additional thermal insulation zones at the joints, improving the thermal insulation of the entire unit. The integration of a triple-glazed unit with an optimized frame system improves thermal resistance and acoustic comfort in the premises. The proposed window unit design combines the high strength of a wooden profile with increased energy efficiency, making the structure suitable for use in low-rise and energy-efficient construction.*

Keywords: *wooden window unit, laminated timber, extruded polystyrene foam, triple-glazed unit, argon filling, heat transfer, thermal insulation, sound insulation.*

Аннотация*. Разработан эффективный подход к повышению энергоэффективности оконных блоков на основе деревянного многослойного клееного бруса с интегрированной теплоизоляционной вставкой XPS и трёхкамерным стеклопакетом. Вследствие использования многослойного бруса обеспечивается повышение прочности и стабильности геометрических размеров рамы, а интегрированная теплоизоляционная вставка снижает теплопотери за счёт уменьшения теплопроводности профиля. Известно, что теплоизоляционные свойства оконных конструкций зависят не только от характеристик стеклопакета, но и от материала рамных профилей, их геометрии и качества сцепления слоёв. В деревянных оконных блоках прочность и долговечность достигаются за счёт многослойного бруса, однако общая энергоэффективность конструкции определяется взаимодействием теплоизоляционной вставки и рамного профиля. В результате исследований установлено, что применение вставки XPS обеспечивает значительное снижение теплопроводности и формирует дополнительные зоны термоизоляции в местах соединений, что улучшает теплоизоляцию всего блока. Интеграция трёхкамерного стеклопакета с оптимизированной рамной системой позволяет повысить сопротивление теплопередаче и*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

акустический комфорт помещений. Предложенный способ конструирования оконного блока обеспечивает сочетание высокой прочности деревянного профиля с повышенной энергоэффективностью, что делает конструкцию пригодной для применения в малоэтажном и энергоэффективном строительстве.

Ключевые слова: *деревянный оконный блок, клееный брус, экструзионный пенополистирол, трехкамерный стеклопакет, аргоновое заполнение, теплопередача, теплоизоляция, звукоизоляция.*

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

Введение

В последние годы в строительной отрасли быстро развивается экологически ориентированная «зеленая» тенденция, обусловленная ограниченной доступностью традиционных энергетических ресурсов и необходимостью повышения энергоэффективности зданий. Поскольку жилые здания потребляют значительное количество энергии, снижение теплопотерь через ограждающие конструкции здания является критически важной задачей для обеспечения устойчивого развития и повышения теплового комфорта [1, 10].

Оконные системы существенно влияют на энергоэффективность зданий: они обеспечивают естественное освещение и вентиляцию, но при этом выступают одним из основных источников тепловых потерь [10, 13]. В отличие от непрозрачных элементов конструкции, окна обладают повышенной теплопроводностью вследствие наличия стеклопакета, рамных профилей и монтажных соединений [13]. Даже при применении современных стеклопакетов значительные теплопотери наблюдаются в зонах тепловых мостов, особенно в местах угловых соединений рам и в узлах примыкания [2, 14, 15].

Тепловые характеристики окон в значительной степени зависят от материала и конструкции профиля рамы. Древесина является перспективным материалом благодаря низкой теплопроводности, экологичности и благоприятным механическим свойствам [11, 20]. Теплопроводность древесины варьируется в зависимости от направления волокон и плотности, поэтому это необходимо учитывать при проектировании конструкций [12]. Использование клееного многослойного бруса повышает геометрическую стабильность и долговечность оконных систем за счет снижения внутренних напряжений и деформаций [4, 12].

Исследования последних лет направлены на повышение энергоэффективности окон за счет совершенствования как стеклопакетов, так и рамных конструкций. Экспериментальные работы показывают, что конфигурация стеклопакета и конструкция рамы оказывают существенное влияние на теплопередачу и звукоизоляцию [5, 7]. Одним из перспективных направлений является интеграция теплоизоляционных материалов в

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

структуру рамы, что позволяет снизить теплопередачу за счет разрыва теплового потока при сохранении прочностных характеристик [6, 8].

Несмотря на значительное количество исследований отдельных элементов оконных систем, большинство из них рассматривает стеклопакеты, материалы рам и теплоизоляцию отдельно [10, 11]. Комплексные решения которые учитывают их совместное влияние, остаются недостаточно изученными. В связи с этим актуальной задачей является разработка деревянных оконных конструкций с повышенными тепло- и звукоизоляционными характеристиками при сохранении конструкционной надежности [3, 18].

Обзор литературы

Оконные конструкции являются одними из наиболее уязвимых элементов ограждающей оболочки здания с точки зрения теплотехнических и акустических характеристик. Согласно исследованию [25], через оконные проемы может теряться до 25 % суммарной тепловой энергии даже при наличии высокоэффективной теплоизоляции стен и кровли. Одновременно с этим, в современных городах с высокой плотностью застройки и интенсивным движением транспорта, остро стоит вопрос эффективной звукоизоляции помещений [7].

Автор [22] указывает, что улучшение тепло- и звукоизоляционных свойств оконных систем достигается за счет использования многослойных стеклопакетов с низкоэмиссионным покрытием (Low-E) и заполнением камер инертными газами (аргон, криптон, ксенон). Исследования [26, 27] показывают, что вакуумное остекление, при малой толщине конструкций, способно обеспечить коэффициент теплопередачи $0{,}4–0{,}5 Вт/(м^2 \cdot К)$. Однако высокая стоимость производства и технологическая сложность вакуумных стеклопакетов в настоящее время ограничивают их широкое применение в массовом жилищном строительстве.

Помимо систем остекления, ряд исследований подчеркнули важность конструкции оконной рамы для обеспечения высокой теплоизоляции. Согласно исследованиям авторов [21, 3], тепловые характеристики деревянных оконных рам значительно различаются в зависимости от породы древесины, ориентации волокон и конфигурации профиля конструкции.

Исследования, представленные в работах [5, 28], демонстрируют, что использование ламинированного стекла с акустическими полимерными промежуточными прослойками эффективно повышает индекс изоляции воздушного шума, достигая значений в диапазоне 36-40 дБ. В работе [29], общая звукоизоляционная способность оконных блоков зависит не только от характеристик самого стеклопакета

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

(толщины и состава), но и от таких факторов, как жесткость оконной рамы, герметичностью соединений и качеством монтажа оконного блока.

Согласно исследованию [24], эластичность и воздухонепроницаемость уплотнительных материалов поддерживаются в значительном температурном интервале (обычно от -30 °C до +35 °C). Это обеспечивает компенсацию деформаций древесины и предотвращает нежелательные утечки воздуха. Нарушение целостности или ухудшение свойств уплотнительных элементов может привести к существенному снижению эксплуатационных характеристик даже самых высокоэффективных стекольных систем.

Исследования [21, 24] показывают, что при влажности древесины порядка 12% коэффициент теплопроводности хвойных пород находится в диапазоне $0{,}10 - 0{,}17 \text{Вт} \cdot \text{м} - 1 \cdot \text{К} - 1$, а для некоторых лиственных пород он составляет $0{,}15 - 0{,}21 \text{Вт} \cdot \text{м} - 1 \cdot \text{К} - 1$. Эти значения существенно уступают показателям теплопроводности металлических материалов, часто используемых в оконных конструкциях.

При изготовлении современных оконных конструкций широко используется клееная древесина, которая формируется из нескольких слоев древесины. Ориентация волокон в этих слоях чередуется, что обеспечивает высокую структурную прочность. Такой подход позволяет значительно улучшить стабильность геометрических размеров изделий, уменьшить остаточные внутренние напряжения и снизить вероятность проявления естественных пороков, присущих цельной древесине [3].

Важной характеристикой древесины является ее относительно низкий линейный коэффициент теплового расширения. Этот показатель составляет порядка$\alpha \approx (5 - 6) \times 10^{-6} K^{-1}$. Для сравнения, аналогичные полимерные материалы, такие как ПВХ, обладают значительно более высоким коэффициентом теплового расширения, достигающим $\alpha \approx 70 \times 10^{-6} K^{-1}$ [23]. Это делает деревянные рамы более устойчивыми к температурным колебаниям.

С точки зрения конструктивных особенностей, деревянные оконные рамы обладают достаточной прочностью, чтобы выдерживать установку двойных стеклопакетов малого и среднего размера без использования дополнительного металлического усиления. В работе [21], установлено, что пластиковые оконные конструкции нуждаются в стальных вкладышах, которые, в свою очередь, могут создавать участки с повышенной теплопроводностью, негативно сказываясь на общих теплоизоляционных свойствах всей конструкции.

Анализ устойчивости деревянных окон, представленный в источнике [22], свидетельствует об их положительном влиянии на окружающую среду, при условии правильной обработки и эксплуатации. Для обеспечения долговечности и защиты от

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

неблагоприятных факторов, таких как влага, биологическое поражение и климатические воздействия, требуется качественная обработка поверхности защитными составами, такими как краски и лаки.

Несмотря на значительный прогресс в области оконных технологий, анализ литературы выявляет ряд сохраняющихся проблем. В регионах с континентальным климатом и резкими сезонными колебаниями температуры особое значение приобретает правильный выбор пород древесины, клеевых составов, защитных покрытий и уплотнительных материалов. В целом проведенный анализ показывает, что требуется дальнейшая оптимизация конструкций деревянных оконных систем для достижения баланса между тепловыми и акустическими характеристиками, долговечностью и экономической эффективностью в условиях конкретных климатических регионов.

Все это позволяет утверждать о необходимости разработки энергоэффективного деревянного оконного блока из трехслойного клееного бруса с целью улучшения тепло- и шумоизоляционных характеристик.

Материалы и методы

Клееный брус представляет собой конструкционный материал, получаемый путем склеивания отдельных ламелей древесины под давлением. В настоящем исследовании использовался трехслойный клееный брус из хвойных пород древесины (сосна) с чередующейся ориентацией волокон. Общая толщина рамного профиля составляла 92 мм. Многослойная структура обеспечивает высокую геометрическую стабильность, снижает вероятность коробления и растрескивания при изменении температурно-влажностных условий эксплуатации, а также повышает долговечность конструкции [4, 12].

В качестве теплоизоляционного материала применялся экструдированный пенополистирол (XPS) с закрытой ячеистой структурой. Материал характеризуется низкой теплопроводностью (λ = 0,030–0,035 Вт/(м·К)), высокой влагостойкостью и стабильностью теплоизоляционных свойств при длительной эксплуатации. В исследуемых оконных блоках XPS использовался в виде вставки толщиной 30 мм, размещенной в фрезерованной полости центральной части рамного профиля, что обеспечивало разрыв теплового потока через конструкцию [8] (рисунок 4).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рисунок 4 – Экструдированный пенополистирол (XPS), используемый в качестве теплоизоляционной вставки в конструкции оконного блока

Светопрозрачная часть окон выполнялась в виде стеклопакета, состоящего из четырех стекол и трех межстекольных камер, заполненных аргоном. Общая толщина стеклопакета составляла 44 мм. Применение многокамерной конструкции и инертного газа позволяет снизить коэффициент теплопередачи и повысить звукоизоляционные характеристики оконной системы [5, 10].

Гипотеза исследования заключалась в том, что интеграция теплоизоляционной вставки непосредственно в центральную часть многослойного клееного бруса позволит снизить теплопередачу через рамный профиль за счет разрыва теплового потока при сохранении несущей способности конструкции. Одновременно предполагалось, что оптимизация геометрии профиля, а также выбор материалов и конструктивных решений будет способствовать улучшению акустических характеристик оконной системы.

В рамках настоящего исследования были разработаны и проанализированы три конструкции деревянных оконных блоков:

1. Оконный блок из цельной древесины.
2. Оконный блок из трехслойного клееного бруса с двухкамерным стеклопакетом, заполненным аргоном.
3. Оконный блок из трехслойного клееного бруса с теплоизоляционной вставкой из экструдированного пенополистирола (XPS) и трехкамерным стеклопакетом, заполненным аргоном.

Основной целью разработки данных конструкций являлось определение влияния

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

материала рамного профиля и типа стеклопакета на звукоизоляционные и теплотехнические характеристики оконного блока.

Первая исследуемая конструкция представляет собой традиционный оконный блок из цельной древесины (рисунок 1). Рамный профиль изготовлен из массива сосны. Данный тип конструкции широко применяется в деревянном домостроении благодаря высокой прочности и экологичности материала. Однако цельная древесина обладает более высокой теплопроводностью по сравнению с многослойными конструкциями и может создавать тепловые мостики в зоне оконного профиля [2].

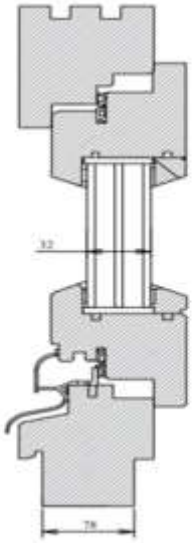


Рисунок 1 - Конструкция оконного блока из цельной древесины

Вторая конструкция представляет собой оконный блок из трехслойного клееного бруса (рисунок 2). Клееная древесина обладает высокой геометрической стабильностью, устойчивостью к деформациям и меньшей вероятностью образования трещин по сравнению с цельной древесиной. Многослойная структура клееного бруса позволяет равномерно распределять внутренние напряжения и повышает долговечность оконной конструкции [4], [12].

В данной конструкции используется двухкамерный стеклопакет, заполненный аргоном. Применение инертного газа в межстекольных камерах уменьшает теплопередачу за счет снижения конвективных потоков внутри стеклопакета [10].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

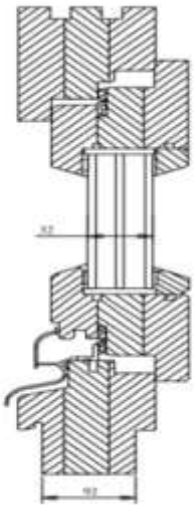


Рисунок 2 - Конструкция оконного блока из трехслойного клееного бруса

Третья конструкция представляет собой усовершенствованный оконный блок, в котором используется трехслойный клееный брус с дополнительной теплоизоляционной вставкой из XPS внутри рамного профиля (рисунок 3). Экструдированный пенополистирол обладает низкой теплопроводностью (0,029–0,034 Вт/(м·К)), что позволяет значительно уменьшить тепловой поток через рамный профиль [8].

Кроме того, в данной конструкции применяется трехкамерный стеклопакет, состоящий из четырех стекол и трех межстекольных камер, заполненных аргоном. Увеличение количества стекол и камер стеклопакета приводит к снижению теплопередачи и повышению звукоизоляционных характеристик оконной системы [5].

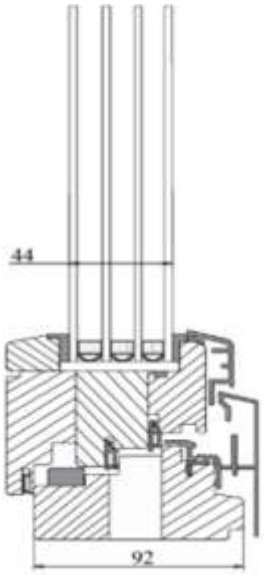


Рисунок 3 - Конструкция оконного блока из клееного бруса с теплоизоляционной вставкой XPS и трехкамерным стеклопакетом

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Основные параметры исследуемых конструкций представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики исследуемых оконных блоков

№ образца	Тип оконного блока	Материал рамы	Тип стеклопакета	Газ в камерах	Толщина профиля, мм
W1	Окно из цельной древесины	Массив сосны	Двухкамерный	Воздух	78
W2	Окно из клееного бруса	Трехслойный клееный брус	Двухкамерный	Аргон	92
W3	Окно из клееного бруса с XPS	Трехслойный клееный брус + XPS	Трехкамерный	Аргон	92

Акустические измерения проводились с использованием генератора широкополосного шума, акустических колонок (50–5000 Гц), измерительных микрофонов первого класса точности, третьоктавных фильтров и шумомера Benetech GM1358. Калибровка оборудования выполнялась в соответствии со стандартами IEC 61672-1:2014, IEC 60942:2003 и ISO 3382-2:2008.

Лабораторные испытания проводились в двух смежных помещениях, между которыми устанавливался исследуемый оконный блок. В одном помещении формировалось звуковое поле, в другом регистрировались уровни звукового давления. Измерения выполнялись в диапазоне частот 100–3150 Гц с использованием различных схем размещения микрофонов и последующим усреднением результатов. Учитывались параметры окружающей среды и уровень фонового шума.

Натурные испытания проводились в условиях реальной эксплуатации. Оконные блоки монтировались в проёмы здания с технологическим зазором около 10 мм, заполненным герметиком. Измерения выполнялись с наружной и внутренней сторон здания в контрольных точках на высоте 1,5 м.

Звукоизоляционные характеристики определялись по разности уровней звукового давления:

$$R = L_1 - L_2,$$

где L_1 — уровень звукового давления в источнике шума, дБ; L_2 — уровень в приёмном помещении, дБ.

Теплотехническая эффективность оценивалась по приведённому коэффициенту теплопередачи окна U_w, рассчитываемому с учётом вклада остекления, рамного профиля и линейных тепловых мостов:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + \psi \cdot L}{A_g + A_f}$$

где:

A_g — площадь остекления, м²;

A_f — площадь рамного профиля, м²;

U_g — коэффициент теплопередачи стеклопакета, Вт/(м²·K);

U_f — коэффициент теплопередачи рамного профиля, Вт/(м²·K);

L — длина линии контакта стеклопакета и рамного профиля, м;

ψ — линейный коэффициент теплопередачи в зоне примыкания стеклопакета к раме, Вт/(м·K).

Расчёт выполнялся в соответствии со стандартом EN ISO 10077-1 [2, 10] с последующим сравнительным анализом полученных результатов для исследуемых конструкций.

Результаты и обсуждения

Результаты лабораторных измерений звукоизоляции исследуемых оконных блоков со стороны приемного помещения (комната высокого уровня) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Лабораторные измерения (комната высокого уровня): уровни в приемном помещении

№ образца	Исходный уровень, дБ	Точка 1, дБ	Точка 2, дБ	Точка 3, дБ	ΔL (среднее), дБ
W1 (цельная древесина + 2-камерный СП, Ar)	77	62,8	62,4	62,6	14,4
W2 (3-сл. клееный брус + 2-камерный СП, Ar)	77	58,6	58,1	58,4	18,3
W3 (3-сл. клееный брус + XPS 20 мм + 3-камерный СП, Ar)	77	53,5	53,0	53,3	23,6

Анализ данных из Таблицы 2 демонстрирует, что замена стандартного окна из массива дерева (W1) на конструкцию из трехслойного клееного бруса (W2) приводит к увеличению среднего показателя шумоподавления примерно на 3.9 дБ, поднимая его с 14.4 до 18.3 дБ. Этот результат подтверждает общепринятое мнение о первостепенной важности сохранения формы профиля и качества уплотнительных элементов в деревянных окнах для эффективности воздушной звукоизоляции. Причина кроется в том, что потери звука через щели сравнялись по величине с потерями, обусловленными стеклопакетом [7], а клееный брус, как материал, гарантирует повышенную структурную стабильность [12].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Наилучшие акустические характеристики, выраженные в показателе ΔL, были достигнуты для образца W3 (23.6 дБ). Этот результат обусловлен комплексным воздействием нескольких факторов: во-первых, использовалось более массивное многослойное остекление (трехкамерный стеклопакет); во-вторых, удалось уменьшить передачу вибраций через каркас профиля благодаря целенаправленным изменениям в акустической жесткости, массе и демпфировании; в-третьих, снизилась подверженность конструкции влиянию температурных мостов и деформаций в процессе эксплуатации, что, в свою очередь, позитивно сказалось на герметичности притворов [2, 5, 6].

Результаты повторных лабораторных измерений со стороны приемного помещения (комната низкого уровня) приведены в таблице 3.

Таблица 3

Лабораторные измерения (комната низкого уровня): уровни в приемном помещении

№ образца	Исходный уровень, дБ	Точка 1, дБ	Точка 2, дБ	Точка 3, дБ	ΔL (среднее), дБ
W1	77	63,2	63,0	62,8	14,0
W2	77	58,9	58,6	58,7	18,2
W3	77	53,9	53,4	53,6	23,4

Сравнительный анализ данных, представленных в Таблицах 2-3, демонстрирует высокую степень воспроизводимости результатов для образцов W1-W3. Отмечается, что максимальное отклонение средних значений ΔL между различными сериями измерений не выходит за пределы 0,4 дБ. Этот факт свидетельствует о стабильности получаемых данных при изменении порядка сборки или перекомпоновке измерительной установки. Таким образом, подтверждается, что основополагающее влияние на наблюдаемые различия оказывают именно конструктивные особенности оконных блоков. Примечательно, что для образцов W1 и W2 зафиксировано несколько большее расхождение между сериями по сравнению с W3. Это явление является ожидаемым для конструкций с менее выраженным акустическим резервом, поскольку в таких случаях даже незначительные неплотности в месте притвора или вариации условий монтажа могут существенно повлиять на конечный результат [7].

Результаты натурных измерений звукоизоляции в условиях внешнего городского шума приведены в таблице 4.

Таблица 4

Натурные измерения: уровни в помещении при воздействии внешнего шума

№ образца	Внешний уровень у фасада, дБ	Точка 1, дБ	Точка 2, дБ	Точка 3, дБ	ΔL (среднее), дБ
W1	74	61,7	62,1	61,9	12,1
W2	74	57,4	57,9	57,6	16,4
W3	74	51,9	52,3	52,1	21,9

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Анализ данных, представленных в Таблице 4, демонстрирует, что переход от контролируемой лабораторной среды к реальным условиям эксплуатации приводит к уменьшению средней величины снижения звуковой мощности ∆L. Данное сокращение составляет приблизительно 2-2.5 дБ для всех исследуемых образцов. Такое изменение закономерно, поскольку в натуральных условиях возникают дополнительные, неуправляемые факторы, такие как низкочастотные шумы от транспорта, боковое распространение звука через элементы ограждающих конструкций, а также изменения в спектре излучения источника звука. Кроме того, усиливается влияние стыковых соединений и примыканий [7]. Несмотря на эти факторы, относительная эффективность конструкций остается неизменной: вариант W3 показывает наиболее выраженный акустический эффект, за ним следуют W2 и W1 соответственно.

Сводное сопоставление результатов трех серий измерений приведено в таблице 5.

Таблица 5

Сравнительный анализ по итогам измерений звукоизоляции

№ образца	Лабораторные испытания (комната высокого уровня), ΔLср, дБ	Лабораторные испытания (комната низкого уровня), ΔLср, дБ	Натурные испытания, ΔLср, дБ	Итоговое ΔLср, дБ
W1	14,4	14,0	12,1	13,5
W2	18,3	18,2	16,4	17,6
W3	23,6	23,4	21,9	23,0

Таблица 5 наглядно демонстрирует четкую закономерность: усовершенствование оконной конструкции, начиная с использования клееного бруса, последующего включения XPS-вставки и завершая применением трехкамерного стеклопакета, ведет к повышению звукоизоляционных характеристик. Обращает на себя внимание тот факт, что разница в звукоизоляции между конфигурациями W3 и W2 достигает в среднем 5.4 дБ. Это значение уже достаточно существенно, чтобы восприниматься как заметное уменьшение уровня внешнего шума, проникающего в помещение (при прочих равных условиях). Данные результаты также хорошо коррелируют с ранее сделанными выводами относительно существенного влияния конфигурации остекления и условий монтажа на акустические свойства окон [5, 7].

Для более полного представления полученных данных в общепринятой акустической терминологии, согласно действующим стандартам, были дополнительно вычислены: индекс звукоизоляции воздушного шума Rw, а также спектральные коррекции C и Ctr. Эти расчеты проводились на основе измерений в третьоктавных полосах частот в диапазоне от 100 до 3150 Гц. Окончательные результаты представлены

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

в таблице 6.

Таблица 6

Интегральные акустические показатели оконных блоков

№ образца	Rw, дБ	C, дБ	Ctr, дБ
W1	31	−1	−4
W2	34	−1	−5
W3	39	−2	−6

Увеличение значения Rw с W1 до W3 на уровне \approx8 дБ является характерным для перехода от стандартной деревянной конструкции к модифицированному варианту, который включает в себя улучшенное остекление и усовершенствованную конструкцию рамы. Этот результат качественно соответствует данным, полученным в научной работе [5] относительно деревянных окон с тройным остеклением. Отрицательные показатели C и Ctr подтверждают прогнозируемое снижение звукоизоляционной способности на низких частотах, связанных с шумом от транспорта. Это явление также укладывается в рамки наблюдений, где низкочастотный спектр шума более выражен в реальных условиях и чаще всего определяет финальную оценку звукоизоляции [7].

Частотная зависимость звукоизоляции приведена в таблице 7 (третьоктавные полосы).

Таблица 7

Частотная характеристика звукоизоляции R(f), дБ

R(f), Гц	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
W1	18	19	20	21	23	24	26	27	29	30	31	32	33	34	35	35
W2	21	22	23	24	26	27	29	30	32	33	34	35	36	37	38	38
W3	26	27	28	29	31	33	35	36	38	39	40	41	42	43	44	44

Согласно данным, представленным в таблице 7, наиболее существенное улучшение звукоизоляционных характеристик наблюдается в диапазоне средних и высоких частот (от 400 Гц и выше). Именно здесь применение многослойного остекления в сочетании с усиленной конструкцией узлов демонстрирует максимальную эффективность. В низкочастотной области (100–250 Гц) разница в показателях оказалась менее выраженной. Это явление согласуется с общеизвестными особенностями оконных конструкций: низкие частоты в большей степени подвержены влиянию бокового (флангового) передачи звука и общей жесткости всей системы, а не только характеристикам самого стеклопакета, указанным производителем [7]. Результаты исследования подтверждают важность комплексного подхода к акустическому совершенствованию окон. Необходимо уделять внимание не только выбору стеклопакета, но и вопросам обеспечения жесткости профиля, а также качеству

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

герметизации примыканий, включая монтажный шов и уплотнители [5, 7, 12].

Оценка теплотехнических характеристик оконных блоков (Ug, Uf и Ψg). Результаты расчета приведенного коэффициента теплопередачи окна Uw для исследуемых конструкций представлены в Таблице 8.

Таблица 8

Исходные теплотехнические параметры для расчета Uw

№ образца	Тип профиля	Тип стеклопакета	Ug, Вт/(м²·K)	Uf, Вт/(м²·K)	Ψg, Вт/(м·K)
W1	цельная древесина	2-камерный, Ar	1.10	1.60	0.060
W2	3-сл. клееный брус	2-камерный, Ar	1.10	1.40	0.050
W3	3-сл. клееный брус + XPS 20 мм	3-камерный, Ar	0.70	1.10	0.040

Коэффициент теплопередачи остекления U_g изменяется в соответствии с известными закономерностями для энергоэффективных оконных систем: его значение уменьшается при увеличении количества камер и использовании инертного газа. При этом вклад рамного профиля и линейного коэффициента теплопередачи ψ_g в зоне примыкания стеклопакета рассматривается как критический из-за образования тепловых мостов [2]. В работах, посвященных энергоэффективности оконных конструкций для зданий (включая эксплуатацию в климатически контрастных условиях), акцентируется, что итоговая эффективность определяется именно совокупностью теплотехнических характеристик остекления, рамы и теплового мостика, а не исключительно значением U_g [1, 10].

Расчёт коэффициента теплопередачи U_w выполнен по формуле (1), результаты представлены в таблице 9. Для сопоставимости результатов использована единая расчётная геометрия оконного блока (условный размер окна), включающая: $A_g = 1{,}30\ \text{м}^2$, $A_f = 0{,}50\ \text{м}^2$, $l_g = 5{,}6\ \text{м}$.

Таблица 9

Результаты расчета U_w для сравниваемых конструкций

№ образца	Ag, м²	Af, м²	lg, м	Uw, Вт/(м²·K)
W1	1.30	0.50	5.6	1.43
W2	1.30	0.50	5.6	1.34
W3	1.30	0.50	5.6	0.94

Анализ результатов, представленных в таблице 9, показывает, что переход от оконного блока из цельной древесины к конструкции из клеёного бруса (W1→W2) сопровождается снижением коэффициента теплопередачи примерно на 6%. Данный эффект обусловлен уменьшением теплопередачи через рамный профиль (U_f) и линейного коэффициента теплопередачи в зоне примыкания стеклопакета (ψ_g) за счёт

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

более стабильной геометрии и оптимизации конструкции рамы [6, 12].

Наиболее существенное снижение теплопередачи наблюдается для конструкции W3. По сравнению с базовой конструкцией W1 значение U_w уменьшается примерно на 34%. Полученный результат объясняется совокупным влиянием нескольких факторов: снижением коэффициента теплопередачи стеклопакета (U_g) при использовании трёхкамерного остекления, а также уменьшением U_f и ψ_g вследствие внедрения теплоизоляционной вставки из XPS, обеспечивающей разрыв теплопроводного пути в центральной части рамного профиля. Полученные результаты согласуются с данными о значительном влиянии тепловых мостов в оконных конструкциях и эффективности их снижения [2], а также с современными подходами к повышению энергоэффективности зданий [10] и оптимизации ограждающих конструкций для климатических условий Казахстана [1].

Следует учитывать, что при использовании полимерных теплоизоляционных материалов важным фактором является долговременная стабильность их свойств. Возможная деградация XPS со временем может приводить к изменению теплотехнических характеристик конструкции, что необходимо учитывать при прогнозировании эксплуатационной эффективности оконного блока [8]. Тем не менее, применение локальной теплоизоляции в структуре рамного профиля остаётся эффективным методом снижения коэффициента теплопередачи U_w, особенно при ограниченной монтажной глубине конструкции [3, 6, 11].

Результаты сравнительного анализа теплотехнических и акустических характеристик деревянных оконных блоков различных конструкций. Сопоставление результатов по акустике показывает, что полученный диапазон $R_w \approx 31 - 39$ дБ для деревянных оконных систем находится в реалистичном интервале для конструкций с многокамерным остеклением. В частности, исследования деревянных окон с тройным остеклением демонстрируют заметное повышение акустической эффективности по сравнению со стандартными решениями, при этом ключевыми факторами остаются тип стеклопакета и герметичность узлов [5]. Наша тенденция W1→W3 (рост R_w и рост R_f в средне-высоких частотах) соответствует именно этой закономерности: увеличение «слоистости» системы и улучшение стабильности притвора приводят к более выраженному эффекту в диапазоне, доминирующем для речевого и бытового шума, тогда как в низкочастотной области преимущество уменьшается из-за фланговых передач и особенностей транспортного спектра [7].

По теплотехнике полученные значения $U_w \approx 1.43 \rightarrow 0.94 \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ отражают переход от базовой деревянной конструкции типичный для энергоэффективных окон к системе, где

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

оптимизированы одновременно U_g, U_f и ψ_g. В экспериментальных работах по тепловым мостикам в элементах рам (включая анализ зоны примыкания стеклопакета) подчеркивается, что именно линейный мост ψ_g часто становится «скрытым» ограничителем, и меры по его уменьшению дают сопоставимый вклад с улучшением U_g [2]. В этом смысле конструкция W3 концептуально согласуется с подходом снижения теплопередачи через рамный профиль при сохранении несущей способности, что активно обсуждается в работах по оптимизации дизайна оконных рам и их гигротепловому поведению [6], [11].

С точки зрения прикладной значимости для зданий, результаты по U_w согласуются с направлением исследований по повышению энергоэффективности ограждающих конструкций в условиях Казахстана и сопоставимых климатов, где уменьшение теплопотерь через окна рассматривается как одна из наиболее эффективных мер энергосбережения [1], [10]. При этом внедрение полимерной вставки XPS требует корректной инженерной интерпретации: хотя вклад в снижение U_f очевиден, долговременная стабильность теплоизоляционных свойств XPS и возможные изменения характеристик со временем должны учитываться при прогнозе жизненного цикла решения [8]. Дополнительно, использование клееного бруса как основы профиля оправдано не только эксплуатационной стабильностью, но и более системным взглядом на материал как промышленный продукт с прогнозируемыми характеристиками. Это соответствует современным подходам к применению клеёного бруса в строительных системах [12] и его оценке в контексте жизненного цикла [4].

В целом, обсуждение результатов подтверждает, что «точечные» улучшения (например, только замена стеклопакета без оптимизации рамы и узлов примыкания) дают ограниченный эффект, тогда как наилучший результат достигается при одновременной оптимизации остекления, рамного профиля и теплового моста, а для акустики — при строгом контроле герметичности монтажного узла и притвора [2], [5], [7], [10]. Именно поэтому сравнение трех конструкций W1–W3 является методически оправданным: оно демонстрирует пошаговый вклад каждого инженерного решения в итоговые показатели, а не просто «констатирует», что один вариант лучше другого.

Выводы

1. В ходе исследования разработана конструкция деревянного оконного блока на основе трехслойного клееного соснового бруса с интегрированной теплоизоляционной вставкой из экструдированного пенополистирола (XPS), расположенной в центральной части рамного профиля, что обеспечивает снижение теплопередачи через рамную зону.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2. Проведен сравнительный анализ трех вариантов оконных конструкций (W1–W3), отличающихся материалом рамного профиля и типом остекления, что позволило определить влияние конструктивных решений на теплотехнические и акустические характеристики оконных блоков.

3. Установлено, что применение многокамерного стеклопакета и клееного бруса приводит к увеличению звукоизоляционных характеристик: индекс изоляции воздушного шума возрастает до $R_w \approx 39$ дБ, при этом наибольший эффект достигается в средне- и высокочастотном диапазоне.

4. Расчеты теплотехнических характеристик показали, что внедрение теплоизоляционной вставки XPS позволяет снизить коэффициент теплопередачи оконного блока с $U_w \approx 1.43$ до $U_w \approx 0.94$ Вт/(м²·K), что свидетельствует о повышении энергоэффективности конструкции.

5. Полученные результаты подтверждают, что наибольший эффект достигается при комплексной оптимизации конструкции, включающей выбор материала рамного профиля, типа стеклопакета и снижение тепловых мостиков, что делает предложенную конструкцию перспективной для применения в условиях континентального климата.

References

1. Tukhtamisheva, A., Adilova, D., Banionis, K., Levinskytė, A., Bliudžius, R. Optimization of the thermal insulation level of residential buildings in the Almaty region of Kazakhstan. Energies, 2020, 13(18), 4692. https://doi.org/10.3390/en13184692

2. Moumtzakis, A., Zoras, S., Evagelopoulos, V., Dimoudi, A. Experimental investigation of thermal bridges and heat transfer through window frame elements at achieving energy saving. Energies, 2022, 15(14), 5055. https://doi.org/10.3390/en15145055

3. Ostapska, K., Jensen, T. M., Gullbreken, L., Ruther, P. Developing slimmer timber window frame. World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE 2023), 3823-3828. https://doi.org/10.52202/069179-0497

4. Nakano, K., Hattori, N., Koide, M., Imago, M., Yamada, Y., Ogawa, T. Life cycle assessment of structural glued laminated timber production with different dimensions and exposure conditions. Journal of Wood Science, 2025, 71, 36. https://doi.org/10.1186/s10086-025-02212-1

5. Miskinis, K., Dikavičius, V., Burlingis, A. The acoustic and thermal characteristics of wooden triple glazed windows. Noise Control Engineering Journal, 2016, 64(4), 485–499. https://doi.org/10.3397/1/376395

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

6. Verichev, K., Díaz-López, C., García-Ruíz, A., Valdenegro, F. Window frame design optimization analysis based on hygrothermal performance and the Level(s) framework. Buildings, 2025, 15(12), 2126. https://doi.org/10.3390/buildings15122126

7. Dulak, L., Nowoświat, A. Effect of window structure and mounting on sound insulation: a laboratory-based study. Sustainability, 2025, 17(15), 6892. https://doi.org/10.3390/su17156892

8. Park, S.-H., Kim, S.-H., Jeong, J.-Y., Kim, H.-J., Seo, D.-H. Detailed building energy impact analysis of XPS insulation degradation using existing long-term experimental data. Energies, 2025, 18(13), 3260. https://doi.org/10.3390/en18133260

9. Wangchuk, P. Hygrothermal analysis of wooden frame and cross-laminated timber wall for energy efficiency and durability in Bhutanese climate. M.A.Sc. thesis, Concordia University, Montreal, Canada, 2023.

10. Qiu, X., Gong, M., Kaboorani, A. A case study on the energy efficiency of windows in institutional and residential buildings. Buildings, 2025, 15(19), 3478. https://doi.org/10.3390/buildings15193478

11. Wang, Z., Yao, L., Shi, Y., Zhao, D., Chen, T. Optimizing the performance of window frames: a comprehensive review of materials in China. Applied Sciences, 2024, 14(14), 6091. https://doi.org/10.3390/app14146091

12. Swedish Wood. The glulam handbook – Volume 1: Facts about glulam. Stockholm, 2024. Available at: Glulam Handbook Volume 1 (PDF)

13. Simões, N., Moghaddam, S. A., da Silva, M. G. Review of the experimental methods for evaluation of windows' thermal transmittance: from standardized tests to new possibilities. Buildings, 2023, 13(3), 703. https://doi.org/10.3390/buildings13030703

14. Šadauskienė, J., Ramanauskas, J., Krawczyk, D. A., Klumbytė, E., Fokaides, P. A. Investigation of thermal bridges of a new high-performance window installation using 2-D and 3-D methodology. Buildings, 2022, 12(5), 572. https://doi.org/10.3390/buildings12050572

15. Qin, X., Liu, H., Zhang, X., Jiang, N., Yang, L., Jin, X. Thermal analysis of the window-wall interface for renovation of historical buildings. Energy and Buildings, 2024, 310, 114108. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114108

16. Saadatian, S., Freire, F., Simões, N. Embodied impacts of window systems: a comparative assessment of framing and glazing alternatives. Journal of Building Engineering, 2021, 35, 102042. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102042

17. Saadatian, S., Rodrigues, C., Freire, F., Simões, N. Key drivers of life-cycle environmental and cost assessment of windows for different European climate zones. Journal of Building Engineering, 2022, 50, 104206. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104206

18. Búryová, D., Vaňová, R., Gregor, M., Uhrín, R., Sedlák, P. Life cycle perspectives of fixed and operable wooden windows. Buildings, 2025, 15(24), 4490. https://doi.org/10.3390/buildings15244490

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

19. Vidmar, G., Repič, R., Lesar, B., Humar, M. Crack size in coating and moisture problems comparing thermally modified and native spruce window frame profiles using hygrothermal simulations. European Journal of Wood and Wood Products, 2024, 82, 2109–2119. https://doi.org/10.1007/s00107-024-02149-0

20. Valentini, F., Maracchini, G., di Filippo, R., Dorigato, A., Bursi, O. A prospective life cycle assessment of insulation and window systems under evolving electricity and recycling scenarios for building energy retrofit in Italy. Energy and Buildings, 2025, 347(A), 116245. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116245

21. Ahn, N., Park, S. Heat transfer analysis of timber windows with different wood species and anatomical direction. Energies, 2020, 13(22), 6050. https://doi.org/10.3390/en13226050

22. Moghaddam, S. A., Serra, C., Gameiro da Silva, M., Simões, N. Comprehensive review and analysis of glazing systems towards nearly zero-energy buildings : Energy Performance, Thermal Comfort, Cost-Effectiveness, and Environmental Impact Perspectives. Energies, 2023, 16(17), 6283. https://doi.org/10.3390/en16176283

23. Paulos, J., Berardi, U. Optimizing the thermal performance of window frames through aerogel enhancements. Applied Energy, 2020, 266, 114776. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114776

24. Flimel, M. Material optimization of wooden window structures to increase their thermal properties. Applied Mechanics and Materials, 2016, 861, 19–23. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.861.19

25. Cuce, E. Accurate and reliable U-value assessment of argon-filled double glazed windows: A numerical and experimental investigation. Energy and Buildings, 2018, 171, 100–106. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.036

26. Jung, W., Kim, D., Ko, S. H. Recent progress in high-efficiency transparent vacuum insulation technologies for carbon neutrality. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2024, 11, 1681–1702 https://doi.org/10.1007/s40684-024-00623-x

27. Peng, J., Tan, Y., Fang, Y., Yang, H., Song, A., Curcija, C., Selkowitz, S. Excellent insulation vacuum glazing for low-carbon buildings: Fabrication, modeling, and evaluation. Engineering, 2025, 53, 18-39 https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.11.027

28. Granzotto, N., Bettarello, F., Ferluga, A., Marsich, L., Schmid, C., Fausti, P., Caniato, M. Energy and acoustic performances of windows and their correlation. Energy and Buildings, 2017, 136, 189–198. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.024

29. Buratti, C., Barelli, L., Moretti, E. (2013). Wooden windows: Sound insulation evaluation by means of artificial neural networks. Applied Acoustics, 74(5), 740–745. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.12.001

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 004

Bakaykin D.A., Epishkin I.A., Idiyatov E.A., Sotov G.E. Restoration of the shape of human limbs based on sensory data in digital technologies

Восстановление формы человеческих конечностей на основе сенсорных данных в цифровых технологиях

Bakaykin Dmitry Alekseevich
student
2nd year student, Mordovian State University. N.P. Ogareva
Russia, Saransk
Epishkin Ilya Andreevich
student
2nd year student, Mordovian State University. N.P. Ogareva
Russia, Saransk
Idiyatov Eldar Anisovich
2nd year student, Mordovian State University. N.P. Ogareva
Russia, Saransk
Sotov Gleb Eduardovich
2nd year student, Mordovian State University. N.P. Ogareva
Russia, Saransk
Бакайкин Дмитрий Алексеевич
студент
2 курс, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
Россия, г. Саранск
Епишкин Илья Андреевич
студент
2 курс, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
Россия, г. Саранск
Идиятов Эльдар Анисович
2 курс, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
Россия, г. Саранск
Сотов Глеб Эдуардович
2 курс, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
Россия, г. Саранск

Abstract. *The article discusses a method for constructing a three-dimensional model of a human limb based on data obtained from tactile sensor arrays during direct contact with the surface.*

Keywords*: 3D modeling, prosthetics, tactile sensors, surface reconstruction, point cloud, pressure distribution, digital model.*

Аннотация. *В статье рассматривается метод построения трёхмерной модели человеческой конечности на основе данных, получаемых с тактильных сенсорных массивов при непосредственном контакте с поверхностью.*

Ключевые слова*: трёхмерное моделирование, протезирование, тактильные сенсоры, реконструкция поверхности, облако точек, распределение давления, цифровая модель.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

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

Практика изготовления протезов до сих пор во многом опирается на подходы, которые сформировались задолго до появления цифровых технологий. Чаще всего речь идёт о классической процедуре снятия гипсового слепка с последующей ручной доработкой. На первый взгляд всё выглядит довольно просто, однако на практике этот процесс требует не только времени, но и высокой точности, а также опыта специалиста. Итоговая форма формируется постепенно – через серию корректировок, где значительная часть решений принимается “на глаз” и уточняется в процессе.

Очевидно, что такая зависимость от человеческого фактора не может не сказываться на результате. Даже при аккуратном соблюдении всех этапов остаётся вероятность неточностей – будь то погрешности формы или особенности обработки материала. В итоге пациенту нередко требуется дополнительная подгонка протеза, а это, в свою очередь, увеличивает общее время изготовления и усложняет весь процесс.

Ситуация начала меняться с развитием технологий трёхмерного моделирования. Возможность перевести форму конечности в цифровой формат открыла новые перспективы: повысилась точность, сократилось время обработки. Современные 3D-сканеры позволяют получать массив координат, на основе которого строится модель. Тем не менее, нельзя сказать, что эти решения полностью лишены ограничений.

Большинство используемых сегодня систем основано на оптических принципах. А это означает зависимость от внешних условий – освещения, отражающих свойств кожи, наличия теней и прочих факторов. Кроме того, такие методы фиксируют форму только в момент съёмки, не учитывая, как ведут себя мягкие ткани под нагрузкой. Для протезирования это критично, поскольку в реальности контакт между телом и протезом всегда сопровождается перераспределением давления.

В последние годы в медицинской инженерии всё чаще поднимается вопрос о необходимости учитывать не только геометрию, но и механические свойства тканей. Это логично приводит к идее комбинирования различных подходов – например, объединения пространственного сканирования с сенсорными технологиями, способными регистрировать параметры контакта.

В рамках данного исследования предлагается подход к получению данных, основанный на непосредственном физическом взаимодействии с поверхностью объекта. Конечность пациента “объекта” размещается внутри устройства представляющей цилиндрическую конструкцию, внутри которой установлен ряд тактильных сенсоров, которые считывают момент контакта с кожей, что в свою очередь

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

позволяет составить в программе систему координат в соответствии с полученными данными от сенсоров.

В результате формируется набор измерений, которые могут рассматриваться как пространственное описание геометрии конечности пациента. В отличие от дистанционных оптических методов сканирования, регистрация данных осуществляется контактным способом с помощью сенсоров, что снижает влияние внешних факторов и условий окружающей среды на результат работы устройства. Особенно это актуально при работе с сильно поврежденными мягкими тканями, где важна точность прилегания протеза с конечностью.

Главная особенность метода это не только регистрация координат точек, но и силы взаимодействия на данный участок, где будет производится протезирование конечности. По итогу, мы можем определить распределение давления по поверхности исследуемого объекта и выявлять зоны повышенной нагрузки и трения. Полученная информация может быть полезна и использована на этапе проектирования протеза с целью повышения функциональности и комфортности пациента [3].

Обработка данных включает в себя несколько последовательных этапов проектирования протеза.

На первом этапе создания протеза производится получение первичных данных для моделирования протеза. Далее, формируется облако точек, описывающее поверхность исследуемого объекта. Завершающим этапом является построение поверхности с помощью методов интерполяции и аппроксимации, при которой разрозненные точки создают поверхность и формируют 3D-модель протеза [5].

Итоговая 3D-модель включает не только геометрическое описание поверхности проектируемого протеза, но и данные о характере взаимодействия с поврежденным участком кожи, чем сильно отличается от традиционных методов сканирования, где информация о силовых характеристиках, как правило, вовсе отсутствует.

Разрабатываемая система представляет собой комплекс аппаратных и программных компонентов. Аппаратная часть представляет собой цилиндрическую конструкцию внутри которой выставлены сенсоры в несколько рядов, в случае чего их местоположение может изменяться в зависимости от поставленной задачи. Данный способ обеспечивает адаптацию и универсальность устройства под различные ситуации проектирования без существенной модификации и лишних вложений [2].

Программная часть устройства состоит из следующих этапов: 1) сбор и первичная обработка данных, 2) построение модели на основе полученных данных и её визуализацию через систему координат. При необходимости в программе будет предусмотрена возможность ручной корректировки полученной модели.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Важно отметить и экономический аспект разработки. Недорогие сенсоры анализа кожи давно используются в малом бизнесе косметических услуг, а также большой спектр использование программных решений с открытым исходным кодом на популярных площадках программирования позволяют снизить общую стоимость системы. Это повышает её потенциальную доступность для государственных и частных медицинских учреждений [1].

Дополнительную перспективу развитию данного подхода придают аддитивные технологии. Наличие готовой цифровой модели позволяет напрямую перейти к изготовлению протеза через любые CAD-системы с использованием 3D-печати, минимизируя количество промежуточных этапов проектирования. Самое главное, корректировки могут вноситься без необходимости повторного сканирования [4].

С учётом растущей потребности в протезировании, обусловленной медицинскими и социальными факторами в Российской Федерации, подобные решения представляют собой актуальное направление исследований.

References

1. Грязнов Д. и др. Перспективы расширения функционала индивидуальных недорогих протезов конечностей за счет применения интеллектуальных датчиков-командеров //Автоматика и программная инженерия. – 2019. – №. 2 (28). – С. 10-17.

2. Кобринский Б. А. Системы искусственного интеллекта в хирургии: возможности, ограничения и перспективы. Обзор литературы //Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. – 2023. – Т. 13. – №. 3. – С. 383-402.

3. Кленевский Г. М. и др. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА РУКИ //Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е. В. Арменского. – 2018. – С. 184-186.

4. Яблочников Е. И., Пирогов А. В., Андреев Ю. С. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении //СПб: СПбГИТМО (ТУ). – 2002. – Т. 92. – С. 2007-2008.

5. Каждан М., Хоппе Х. реконструкция экранированной поверхности Пуассона / ACM Transactions on Graphics (ToG). – 2013. – Т. 32. – № 3. - С. 1-13.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 331.43

Churikov M.V. Development of an air parameters system based on the arduino microcontroller

Разработка системы параметров воздуха производства на базе микроконтроллера arduino

Churikov Maxim Vladimirovich
Student
Moscow State University of Technology «STANKIN»
Moscow, Russia
Чуриков Максим Владимирович
Студент
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"
ФГАОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН"
Москва, Россия

Abstract. *The article solves the actual task of organizing air environment parameters monitoring systems at industrial enterprises. The main controlled indicators are analyzed: maximum permissible concentrations of harmful substances, dustiness, temperature, humidity and air velocity in the working area. The monitoring system of these parameters is developed.*

Keywords: *air parameter system, microcontroller, monitoring, MPC control and production.*

Аннотация. *В статье решена актуальная задача организации систем мониторинга параметров воздушной среды на промышленных предприятиях. Проанализированы основные контролируемые показатели: предельно допустимые концентрации вредных веществ, запыленность, температура, влажность и скорость движения воздуха в рабочей зоне. Разработана система мониторинга данных параметров.*

Ключевые слова: *система параметров воздуха, микроконтроллер, мониторинг, контроль ПДК, производство.*

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

Атмосфера рабочей зоны промышленного предприятия — это сложная многокомпонентная система. Согласно ГОСТ и нормам охраны труда, ключевыми контролируемыми параметрами являются концентрация вредных веществ (газов, аэрозолей, паров), запыленность, температура, влажность и скорость движения воздуха. Однако разовые замеры, проводимые раз в квартал, не отражают реальной картины: выбросы часто носят аварийный или циклический характер. Современный мониторинг параметров воздуха переходит от дискретного контроля к непрерывному онлайн-наблюдению.

Использование связки датчиков газа (MQ-135), пыли (GP2Y1010AU0F) и температуры-влажности (DHT22) на единой платформе позволяет создавать прототипы недорогих, но эффективных систем контроля, способных в режиме реального времени

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

отслеживать ключевые параметры, влияющие на безопасность персонала, сохранность оборудования и качество продукции. Внедрение таких систем на производстве способно стать основой для предиктивного обслуживания, предотвращения аварийных ситуаций и формирования объективной доказательной базы для экологической отчетности. Таким образом, разработка и обоснование эффективности подобного прототипа представляется высокоактуальной научно-практической задачей.

Ниже представлена таблица, в которой представлены параметры качества воздуха, подлежащие измерению, а также методы и технические средства измерения.

Таблица 1

Параметры качества воздуха, методы и технические средства измерения.

Контролируемый параметр	Источник/Опасность	Выбранный датчик	Метод измерения
Концентрация взвешенных частиц PM2.5/PM10	Общий индикатор запыленности от обоих участков	GP2Y1010AU0F	Лазерное рассеяние (высокая точность для мелких частиц)
Концентрация угарного газа (CO)	Неполное сгорание, нагрев смазок	MQ-135	Электрохимический/полупроводниковый
Температура воздуха	Тепловыделение от оборудования, микроклимат	DHT22	Терморезистивный
Относительная влажность воздуха	Микроклимат, влияет на пылеподавление	DHT22	Ёмкостной

Исходя из основных задач системы выбран локальный мониторинг 5 параметров, таких как запылённость, температура, влажность, загазованность и угарный газ, выведена световая и звуковая сигнализация, в случае если ПДК превышает норму, а также возможность записи данных на SD-карту для анализа. В качестве микроконтроллера используется Arduino Uno.

Представлена электрическая схема измерительной системы на рисунке 1.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

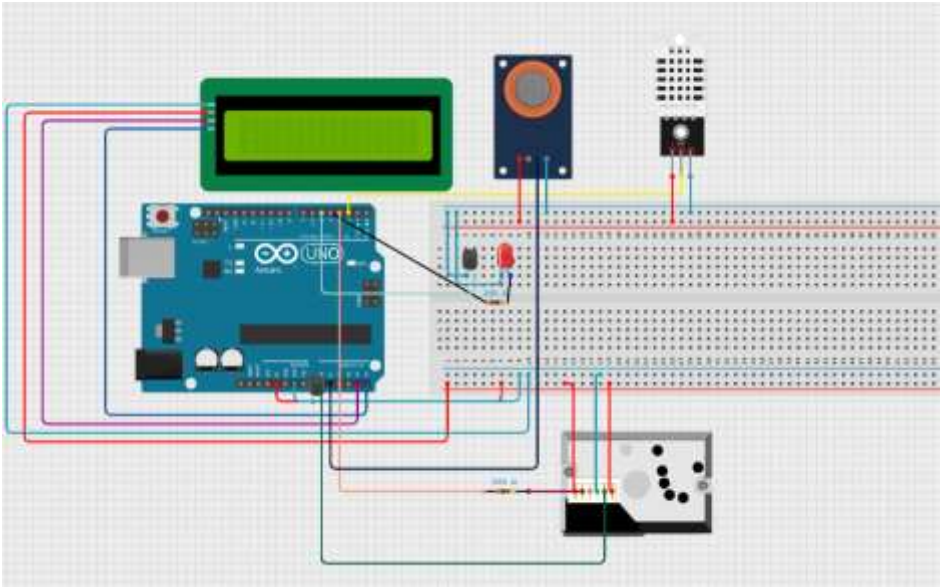


Рисунок 1. Схема измерительной системы на базе Arduino.

Разработанная система мониторинга воздуха представляет собой киберфизическую систему, состоящую из трех основных компонентов:

Физический уровень - датчики для измерения параметров воздуха

Вычислительный уровень - микроконтроллер для обработки данных

Интерфейсный уровень - устройства отображения и сигнализации

Принцип действия системы основан на цикличном опросе датчиков с последующей обработкой полученных данных, анализом их на соответствие нормативным требованиям и выдачей управляющих воздействий на исполнительные устройства.

Всю работу системы можно описать в 4 шагах:

Инициализация и настройка, в которую входит загрузка программы в микроконтроллер, настройка переферии, установка пороговых значений и прогрев датчиков газа.

Измерение параметров воздуха, где происходит опрос датчиков.

Обработка и анализ данных. На этом этапе происходит конвертация значений в физические величины, фильтрация данных и сравнение этих данных с пороговыми значениями, после чего определение общего статуса.

Визуализация и сигнализация. Вывод данных на LCD дисплей, индикация и управление звуковым оповещением.

Хочется отметить, что не менее важно учитывать временные параметры системы, приведённые ниже в таблице 2.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 2

Временные параметры системы.

Операция	Время выполнения	Частота	Примечание
Инициализация системы	180 секунд	1 раз при включении	Прогрев MQ-135
Измерение DHT22	2 секунды	1 раз в 2 секунды	Время отклика датчика
Измерение GP2Y1010	10 миллисекунд	1 раз в 2 секунды	Период измерения 10 мс
Измерение MQ-135	100 миллисекунд	1 раз в 2 секунды	10 измерений по 10 мс
Обработка данных	< 1 миллисекунды	1 раз в 2 секунды	Быстрые вычисления
Обновление LCD	20 миллисекунд	4 раза в секунду	Зависит от I2C скорости
Цикл обработки	50 миллисекунд	20 Гц	Основной такт системы
Запись в лог	100 миллисекунд	1 раз в 5 секунд	Работа с SD картой

Программа для управления микроконтролерром и успешная компиляций данной программы также представлена на рисунке 2.

Рисунок 2. Успешная компиляция программы и сама программа управления.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Система имеет три уровни опасности, это зеленый, желтый и красный.

Зеленый уровень – нормальные условия для работы, нет повода паниковать. При желтом уровне опасности стоит обратить внимание на экран и предпринять нужные меры, например включить вентиляцию и проветрить помещение. При красном уровне опасности стоит остановить работу и предпринять нужные меры. Можно выделить плюсы этой системы, такие как простота и надежность. Сборка этой системы выйдет очень дешево, а ломаться просто напросто тут нечему. Также это гарантирует юридическую защиту предприятию, поскольку работодатель будет осуществлять контроль за состоянием условий труда. Исходя из показателей системы можно сделать вывод какое оборудовние стоит докупить, например, если пыль превышает норму, то стоит добавить в цех пылеуловитель. Все это благотворительно скажется на здоровье рабочих.

Таким образом, была успешно разработана, собрана и программно реализована система мониторинга параметров воздуха на базе микроконтроллерной платформы Arduino. Данная система представляет собой интегрированный комплекс, включающий в себя датчики температуры и влажности DHT22, оптический датчик пыли GP2Y1010AU0F, газоаналитический датчик MQ-135, а также модуль индикации на базе LCD дисплея с интерфейсом I2C.

References

1. Методы и приборы контроля окружающей среды. Экологический мониторинг: учеб. пособие / И. В. Якунина, Н. С. Попов. — Тамбов: Изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та, 2009. — 188 с. 3. Федоров, А. А. Методы анализа объектов природной среды: практическое руководство для студентов педагогических университетов / А. А. Федоров, Г.

2. Экологический мониторинг атмосферы: практикум для бакалавров направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» по профилю «Инженерная защита окружающей среды» / сост. Е. Н. Калюкова. — Ульяновск: УлГТУ, 2015. — 131 с.

3. Руководящий документ РД 52.04.186–89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. — М.: Гидрометеоиздат, 1991. — 693 с.

4. Тихомиров В. И. Автоматизированные системы экологического мониторинга: учеб. пособие для вузов. — М.: Академия, 2010. — 304 с.

5. Arduino Uno. Официальная документация [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.arduino.cc/reference/ru/

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 004.8:331.108

Ovchinnikova S.V., Drabenko V.A., Drabenko N.V. Using artificial intelligence systems in the testing process of security company employees

Использование системы искусственного интеллекта в процессе тестирования сотрудников охранных предприятий

Ovchinnikova S.V., Drabenko V.A., Drabenko N.V.
GAOU IN LO «GSU», Gatchina
Овчинникова С.В., Драбенко В.А., Драбенко Н.В.
ГАОУ ВО ЛО «ГГУ», г. Гатчина

Abstract. *The purpose of this work is to analyze the possibilities of using an artificial intelligence system in the process of testing employees of private security companies. The research method is based on the analysis of scientific approaches to psychodiagnostics, digital technologies for personnel assessment, and personnel data management. The result is the justification of a two-loop testing model using artificial intelligence. It is concluded that the reliability and manageability of assessment can be improved through the responsible use of technologies.*

Keywords: *artificial intelligence, personnel testing, private security companies, psychodiagnostics, personnel assessment, HR technologies*

Аннотация. *Цель работы заключается в анализе возможностей использования системы искусственного интеллекта в процессе тестирования сотрудников частных охранных предприятий. Метод исследования основан на анализе научных подходов к психодиагностике, цифровым технологиям оценки персонала и управлению кадровыми данными. Результатом является обоснование двухконтурной модели тестирования с использованием искусственного интеллекта. Сделан вывод о повышении надежности и управляемости оценки при ответственном применении технологий.*

Ключевые слова: *искусственный интеллект, тестирование персонала, частные охранные предприятия, психодиагностика, кадровая оценка, HR технологии*

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

Охранная деятельность относится к видам профессиональной активности с повышенной социальной ответственностью, где ошибка в оценке пригодности сотрудника может повлечь риски для безопасности объектов, персонала и третьих лиц. В этих условиях приобретает значение качество процедур тестирования и отбора персонала, поскольку именно на этом этапе формируется кадровая надежность охранного предприятия. Современная цифровизация управления персоналом и развитие технологий искусственного интеллекта приводят к трансформации тестирования из разового опросного мероприятия в управляемый контур сбора, анализа и интерпретации данных о сотруднике, что отражает общие тренды применения искусственного интеллекта в HR менеджменте [7]. Целью настоящей статьи является

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

определение возможностей встраивания инструментов искусственного интеллекта в процесс тестирования сотрудников частных охранных предприятий для повышения надежности оценки и управляемости кадровых решений при соблюдении принципов ответственного и нормативно обоснованного применения технологий [1].

Профессиональный отбор сотрудников частных охранных предприятий строится на модели сопоставления психологических и поведенческих характеристик кандидатов с требованиями конкретной охранной деятельности. В рамках данной модели формируется психограмма, отражающая совокупность профессионально важных качеств, обеспечивающих успешное выполнение служебных функций. В качестве базового критерия используется разделение работников на успешных и неуспешных по результатам реальной профессиональной деятельности, после чего проводится анализ различий их психологических показателей. Такой подход позволяет выделить устойчивый набор профессионально важных качеств, включающий эмоциональную устойчивость, самоконтроль, ответственность, способность к соблюдению регламентов и адекватное реагирование на стрессовые ситуации. Эти качества рассматриваются как целевая структура тестирования, поскольку они непосредственно связаны с надежностью охранной деятельности и уровнем профессиональной пригодности сотрудника. Психодиагностические методики в данной модели выполняют функцию инструмента выявления соответствия личности кандидата требованиям профессии, а их интерпретация опирается на сопоставление с эталонной психограммой успешного охранника [2].

Классические психодиагностические тесты, применяемые при отборе охранников, обладают рядом уязвимостей, связанных с влиянием внешних факторов и формальным прохождением процедур. Результаты тестирования могут искажаться вследствие снижения внимания, усталости, намеренного искажения ответов или адаптации испытуемого к ожидаемым требованиям. В этих условиях внедрение цифровых технологий позволяет дополнить традиционную диагностику объективными данными о процессе прохождения тестов:

- Использование компьютерного зрения и окулографии обеспечивает фиксацию параметров вовлеченности, концентрации внимания и поведенческих реакций в ходе выполнения заданий.
- Обратная связь, реализованная в программном комплексе психодиагностики, позволяет адаптировать сценарий тестирования в реальном времени, изменяя темп, сложность или форму предъявления стимулов.
- Персонификация интерфейса снижает влияние случайных факторов и повышает валидность результатов за счет учета индивидуальных особенностей

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

испытуемого. Таким образом, контур вовлеченности выступает механизмом верификации данных, позволяя выявлять формальное участие и повышать надежность выводов о профессиональной пригодности сотрудника охранного предприятия [3].

Связка профессионально важных качеств и цифровой психодиагностики формирует основу для перехода к более объективному и управляемому тестированию персонала. Профессионально важные качества определяют содержание оценки, цифровые инструменты задают способ их измерения, а требования ответственного использования данных ограничивают рамки применения результатов. К таким требованиям относятся прозрачность диагностических критериев, защита конфиденциальности персональной информации и минимизация субъективности интерпретации результатов. Соблюдение этих принципов позволяет использовать данные тестирования не только для первичного отбора, но и для последующих кадровых решений без нарушения социальных и нормативных ожиданий. Применение искусственного интеллекта в данном контуре способствует снижению влияния человеческого фактора на оценку и усиливает доверие к процедурам тестирования при условии их регламентированного и этически обоснованного использования [1; 5].

Встраивание искусственного интеллекта в регулярную оценку и контроль деятельности частных охранных предприятий предполагает формирование единого контура данных, отражающего основные параметры служебной деятельности сотрудников. В автоматизированной системе фиксируются сведения об учете рабочего времени, фактах нарушений, перемещениях между объектами и изменениях кадрового статуса. В качестве ключевых сущностей базы данных выступают сотрудники, охраняемые объекты, договоры с заказчиками, зарегистрированные нарушения и информация о уволенных работниках. Интеграция этих сущностей в единое информационное пространство обеспечивает актуализацию данных в реальном времени и исключает дублирование информации между подразделениями. Использование интеллектуальных алгоритмов в таком контуре позволяет автоматизировать выявление отклонений от регламентов и ускорить подготовку управленческих документов. Практический эффект выражается в снижении числа ошибок при обработке информации, повышении прозрачности контроля и сокращении временных затрат на документооборот, что повышает управляемость охранной деятельности в целом [4].

Регулярная оценка персонала на основе данных тестирования и служебных показателей требует их приведения к сопоставимому и интерпретируемому виду. Для

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

этого используется метрическая сборка, предполагающая формирование интегральной оценки на основе совокупности нормированных показателей. В качестве таких показателей могут применяться данные об отсутствии на рабочем месте, количестве сверхурочных часов, результатах опросов, отражающих уровень стресса и лояльности, а также сведения, полученные через цифровые опросники и чат боты. Табель учета рабочего времени и результаты анкетирования рассматриваются как источники объективной и субъективной информации, дополняющие друг друга. Искусственный интеллект обеспечивает обработку этих данных и расчет обобщенного коэффициента, который отражает текущее состояние кадрового ресурса. При этом принципиально важно, чтобы используемые метрики были прозрачными по содержанию и понятными для руководителя, что позволяет применять результаты оценки в управленческих решениях без утраты их практического смысла [6].

Внедрение искусственного интеллекта в процессы оценки и контроля деятельности частных охранных предприятий связано с рядом обязательных условий. К числу ключевых проблем относятся технические ограничения, организационные барьеры, юридические риски и вопросы информационной безопасности. Наряду с этим выделяются социальные и этические аспекты, связанные с обработкой персональных данных и возможной предвзятостью алгоритмов. Возможности применения искусственного интеллекта выражаются в повышении объективности и скорости анализа, однако угрозы проявляются при отсутствии четкого разграничения ответственности между человеком и системой. В качестве рекомендаций по внедрению следует отметить необходимость контроля алгоритмической предвзятости, установления регламентов доступа к данным и закрепления роли специалиста как конечного субъекта принятия решения. Соблюдение данных условий позволяет использовать потенциал искусственного интеллекта без нарушения нормативных и социальных ожиданий в сфере управления персоналом [1; 5; 7].

Таким образом, использование системы искусственного интеллекта в процессе тестирования сотрудников частных охранных предприятий целесообразно рассматривать как построение двухконтурной модели оценки, в которой базовая психодиагностика и выявление профессионально важных качеств дополняются контролем качества прохождения тестов и адаптацией диагностических процедур, что повышает надежность выводов о профессиональной пригодности. Практический эффект применения искусственного интеллекта усиливается в том случае, когда результаты тестирования интегрируются с регулярными данными о дисциплине, режиме труда и зарегистрированных нарушениях в рамках единого управленческого контура и переводятся в понятные и интерпретируемые для руководства метрики и

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

коэффициенты оценки кадрового ресурса. Вместе с тем внедрение данных технологий требует ответственного подхода, при котором правовые, этические, организационные и информационные риски фиксируются заранее и регламентируются, поскольку в противном случае рост автоматизации может привести к формированию новых уязвимостей в системе управления персоналом.

References

1. Белобородов Д. А. Социальные параметры использования искусственного интеллекта для управления кадровым потенциалом //Общество: социология, психология, педагогика. – 2023. – №. 6 (110). – С. 61-67.
2. Зубков В. И. Методика отбора персонала в частной охранной организации: взгляд социолога //Вестник Московского университета. Серия 18. Социология и политология. – 2021. – Т. 27. – №. 3. – С. 186-207.
3. Иващенко А. В. и др. Реализация программного комплекса психодиагностики с обратной связью на основе компьютерного зрения //Программные продукты и системы. – 2024. – Т. 37. – №. 2. – С. 193-200.
4. Колоденкова А. Е. Автоматизация процесса контроля и выявления нарушений сотрудников частных охранных предприятий с учетом специализации объектов //Программные продукты и системы. – 2025. – Т. 38. – №. 3. – С. 534-541.
5. Овчинникова О. П., Лебедева Д. В. Искусственный интеллект в управлении персоналом: возможности и угрозы //Вопросы управления. – 2024. – Т. 18. – №. 4 (89). – С. 55-66.
6. Окладникова С. В., Панкрашов А. С. Применение технологий искусственного интеллекта в hr-менеджменте //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50. – №. 2. – С. 117-125.
7. Руденко Л. Г. Тренды применения искусственного интеллекта в HR-менеджменте //Государственная служба. – 2024. – Т. 26. – №. 6 (152). – С. 96-105.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 621

Starostin A.O., Dragin V.S., Kupriyanova O.P. Dragina O.G. Methodology of seamless data transfer in the «3D model – technological process–control program» chain

Методология бесшовной передачи данных в цепочке «3D-модель – технологический процесс–управляющая программа»

Starostin Anton Olegovich
Student
Dragin Vladimir Sergeevich
Student
Kupriyanova Olga Pavlovna
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor of the Department «Technology, Equipment and Automation of Machine-building industries»,
Dragina Olga Gennadievna
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Head of the Department «Technology, Equipment and Automation of Machine-building industries»
Yegoryevsk Institute of technology (branch)
Moscow State University of Technology «STANKIN»
Yegoryevsk, Russia
Старостин Антон Олегович
Студент
Драгин Владимир Сергеевич
Студент
Куприянова Ольга Павловна
Доцент кафедры «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств»
Драгина Ольга Геннадьевна
Кандидат технических наук, доцент
Заведующий кафедрой «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств»
Егорьевский технологический институт (филиал)
ФГАОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»
Егорьевск, Россия

Abstract. *The article discusses the concept of end – to-end automation - seamless data transfer from a three-dimensional model of a part to a technological process and further to a control program for a CNC machine. How to implement a single data stream in practice, what software tools are needed for this, and what advantages does an enterprise gain by implementing end-to-end technologies.*

Keywords: *3D, model, detail, automation, technology.*

Аннотация. *В статье рассматривается концепция сквозной автоматизации – бесшовной передачи данных от трехмерной модели детали к технологическому процессу и далее к управляющей программе для станка с ЧПУ. Как на практике реализовать единый поток данных, какие программные средства для этого необходимы и какие преимущества получает предприятие, внедряя сквозные технологии.*

Ключевые слова: *3D, модель, деталь, автоматизация, технология.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

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

Сквозная автоматизация – это процесс, в ходе которого все этапы жизненного цикла изделия взаимосвязаны начиная от проектирования изделия и заканчивая его вводом в эксплуатацию, что позволяет упростить разработку изделия. В контексте технологической подготовки производства (ТПП) это означает, что 3D-модель, созданная конструктором, становится единственным и главным источником данных для всех дальнейших этапов. [1]

Ключевое отличие сквозного подхода от традиционного заключается в следующем:

1. Традиционный подход: Конструктор создает чертеж. Технолог читает чертеж, интерпретирует его и вручную заполняет технологические карты, рассчитывает режимы и пишет управляющую программу. Это чревато тем, что любое изменение в чертеже влечет за собой ручную перенастройку всех документов.
2. Сквозной подход: Конструктор создает 3D-модель изделия. Технолог работает с этой моделью, система автоматически рассчитывает геометрию, размеры, допуски и обозначения шероховатости. На основе полученных данных система генерирует техпроцесс и траектории обработки. Если конструктор меняет модель, технолог получает уведомление, а связанные данные обновляются полуавтоматически.

Для реализации единого потока необходима интеграция нескольких классов программного обеспечения. Центральную роль в этой экосистеме играет PDM-система (Product Data Management), которая управляет данными об изделии и обеспечивает взаимодействие между различными приложениями. Рассмотрим типовую архитектуру сквозного решения на примере программного комплекса АСКОН.

Архитектура сквозного решения:

– CAD (Система автоматизированного проектирования): КОМПАС-3D. Здесь создается 3D-модель — источник данных.

– PDM/PLM (Управление данными): ЛОЦМАН:PLM. Центральное хранилище, управляет структурой изделия, версиями документации и потоками работ.

– CAPP (Автоматизация техпроцессов): ВЕРТИКАЛЬ. Система для проектирования техпроцессов, которая напрямую получает данные из CAD через PDM.

– CAM (Подготовка управляющих программ (УП) для ЧПУ): ГеММа-3D, ESPRIT, КОМПАС-3D. Модули для расчета траекторий обработки на основе геометрии модели. [2,3,8]

Первым и важнейшим этапом является автоматическое извлечение информации из 3D-модели. Как отмечается в научных исследованиях, для этого используются

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

интерфейсы прикладного программирования (API) CAD-систем. Это позволяет получать не только геометрию, но и:

– метаданные (обозначение, наименование детали);

– свойства материала (из справочника, интегрированного с CAD);

– параметры аннотаций (допуски, шероховатости);

– параметрические переменные модели.

Эта информация автоматически подгружается в CAPP-систему (Computer-Aided Process Planning), что исключает ошибки ввода и экономит время технолога.

Наиболее продвинутым уровнем сквозной автоматизации является применение конструкторско-технологической параметризации. Благодаря ей, между элементами 3D-модели и параметрами технологического процесса (например, траекториями обработки) устанавливаются ассоциативные связи.

Что это дает на практике? Возможность быстрого внесения изменений. Если конструктор изменяет диаметр отверстия в модели, технологу не нужно пересчитывать режимы резания и заново строить траекторию сверления. Ассоциативная CAM-система автоматически подстроит траекторию под новый диаметр, а CAPP-система пересчитает режимы, если они привязаны к параметрам модели. Новые значения тут же попадут в технологическую документацию.

Такой подход наиболее эффективен для деталей, имеющих несколько размерных модификаций, или для производства семейств однотипных изделий.

Однако внедрение сквозной автоматизации — это не только установка программного обеспечения. Как подчеркивают разработчики, ключевую роль играет методология применения — процессная модель.

Прежде чем настраивать интеграцию, необходимо четко описать, как у вас на предприятии происходит:

- Разработка документов и данных: кто и как создает 3D-модели, техпроцессы, УП.
- Согласование и утверждение: как проходят маршруты согласования электронных документов.
- Архивное хранение и выдача: как происходит учет и выдача документации в цеха.
- Проведение изменений: как уведомлять всех участников об изменениях в модели.

Эти процессы должны быть формализованы и закреплены в регламентах, и только после этого можно переходить к технической реализации.

Сквозная автоматизация, связывающая 3D-модель, технологию и документацию, перестает быть просто модным трендом и становится необходимым условием конкурентоспособности. Переход от разрозненных CAD/CAPP/CAM-систем к интегрированному решению на базе PDM-платформы позволяет:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

— Исключить всевозможные ошибки при ручном вводе.
— Сократить время ТПП за счет автоматического извлечения информации из 3D-модели.
— Ускорить внесение изменений благодаря параметризации и ассоциативным связям.
— Создать основу для цифровых двойников изделий и процессов.

Главный залог успеха — не только покупка современного ПО, но и тщательная проработка процессной модели предприятия и обучение персонала работе в едином информационном пространстве. Только в этом случае слово «сквозная» наполнится реальным смыслом, а цифровой поток данных начнет работать на вашу эффективность.

Практическое применение сквозной автоматизации с применение программ АСКОН:

1. Создание 3D-модели:

Для создания 3D-модели отлично подойдёт одна из программ АСКОН под названием «Компас 3D». С помощью нее можно создавать как 3D-модели, так и чертеж детали.

Пример получаемой детали представлен на рисунке 1.

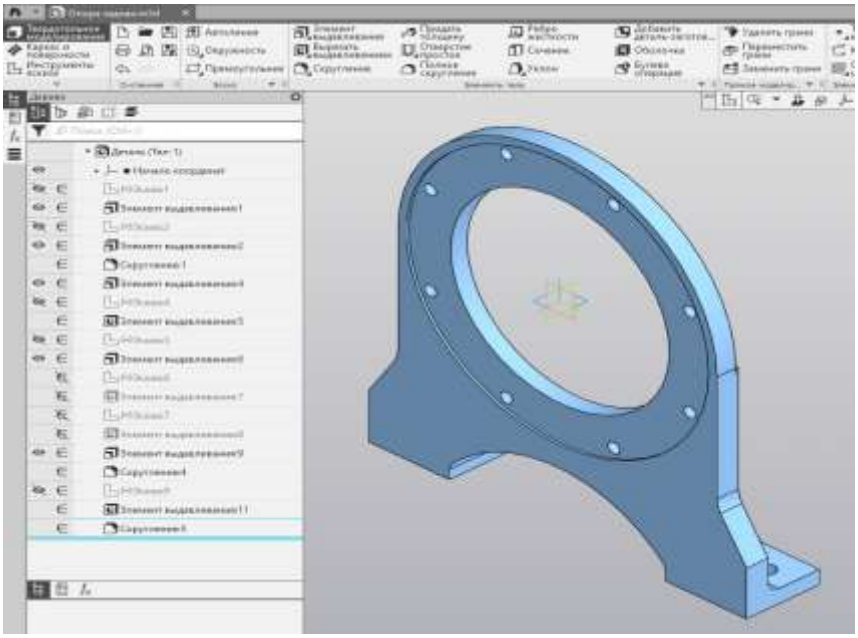


Рис. 1 – Пример 3D модели в программе Компас 3D

2. Написание технологии обработки:

Для написания технологии обработки нам подойдет программ АСКОН под названием «ВЕРТИКАЛЬ». Это один из модулей программы компас 3D. Она позволяет.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

— проектировать технологические процессы в автоматизированном режиме [4-7];
— рассчитывать материальные и трудовые затраты производства;
— формировать все необходимые комплекты технологической документации, используемые на предприятии;
— организовать и развивать технологические базы данных предприятия;
— передавать данные в различные системы планирования и управления (классов PDM/MRP/ERP), а также организовывать совместную работу с модулями и приложениями, разработанными на предприятии.

Пример создания технологии обработки детали представлен на рисунке 2.

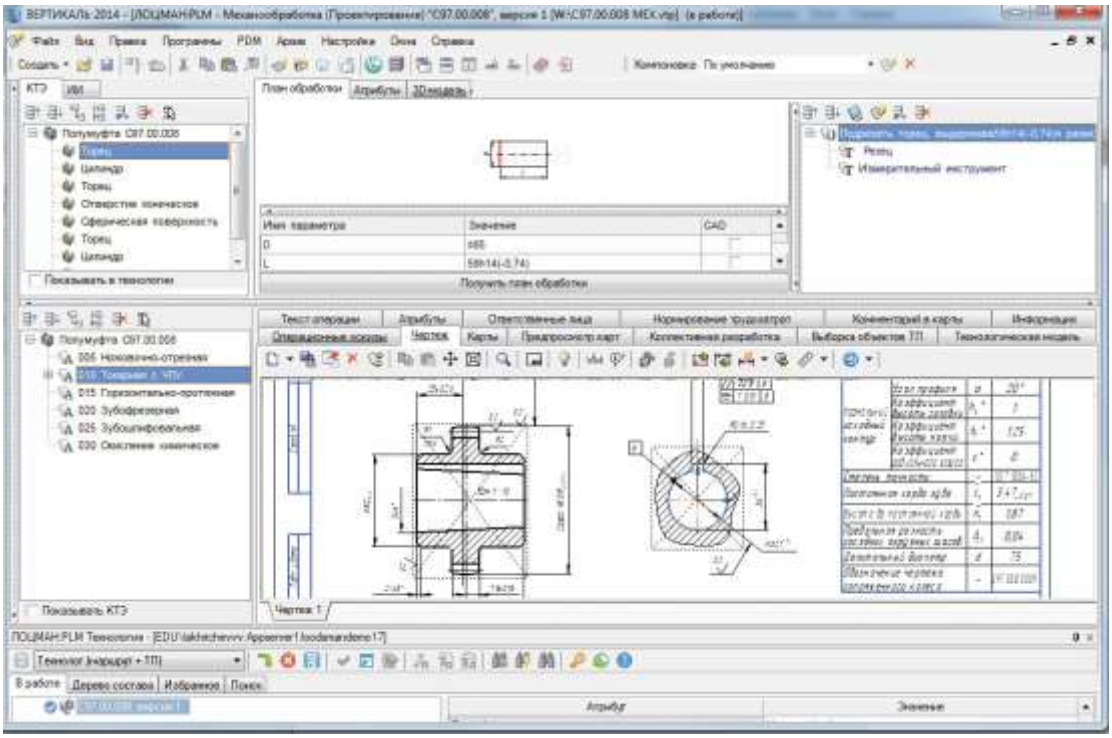


Рис. 2 – Написание технологии обработки

3. Автоматизации написания цикла обработки заготовки на станках с числовым программным управление (Далее ЧПУ) [3,8]:

Для автоматизации написания цикла обработки заготовки можно использовать модули программы компас 3D под названием «Модуль ЧПУ. Токарная» и «Модуль ЧПУ. Фрезерная».

Данный модули позволяют в автоматическом режиме написать код программы для обработки детали как для токарной, так и для фрезерной обработки. Что бы начать создавать программу необходимо загрузить 3D модель детали в программу. Затем проставить на модели начало координат станка. Пример задания нуля детали

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

представлен на рисунке 3. Затем задать размеры заготовки и используемые инструменты. Пример задания заготовки представлен на рисунке 4.

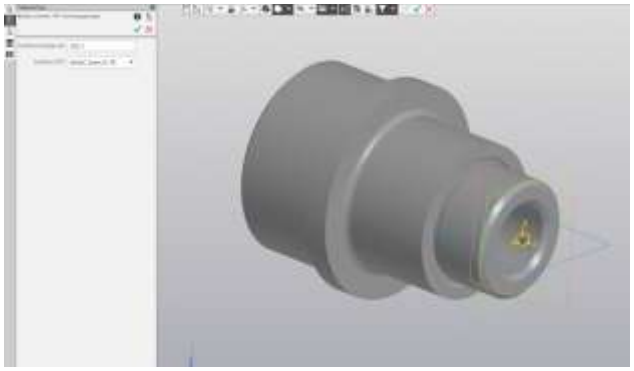


Рис. 3 – Задание нуля станка

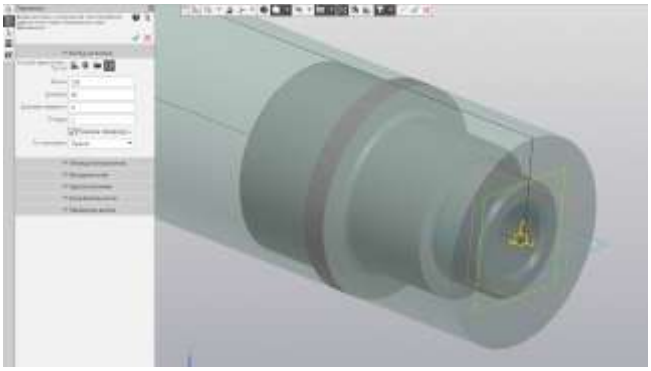


Рис. 4 – Создание заготовки

После необходимо задать этапы обработки в программу указав инструмент, поверхности подлежащие обработке и другие параметры. После задания всех значений мы увидим маршрут обработки детали и сможем запустить симуляцию обработки заготовки. Получаемый результат после написания этапов обработки представлен на рисунке 5, а симуляция обработки на рисунке 6.

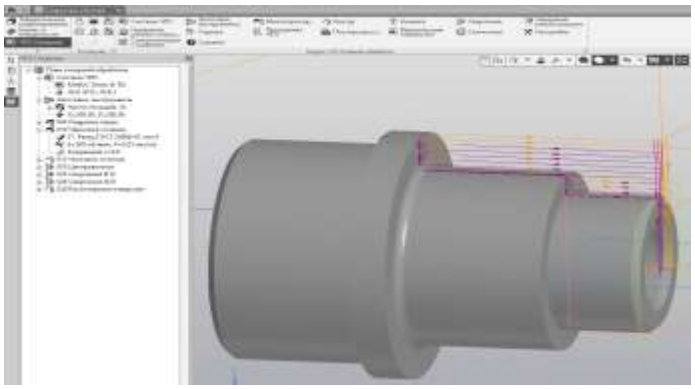


Рис. 5 – Полученные этапы обработки и маршрут обработки

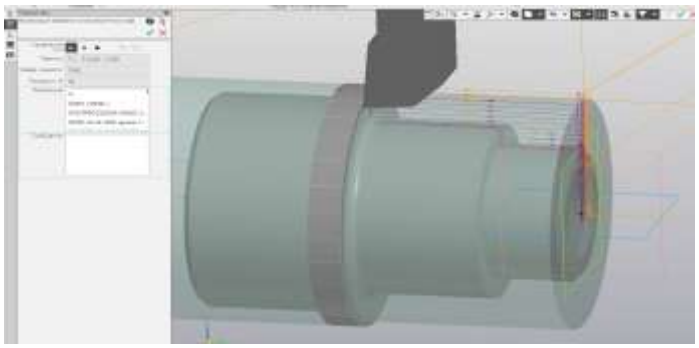


Рис. 6 – Симуляция обработки

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

4. Создание документации:

Для разработки документации также подойдет программа Компас 3D. В ней мы можем написать спецификацию на изделии, в котором будет перечислен перечень необходимых деталей и их количество. Детали могут быть как записаны вручную, так и автоматически подгружены со сборочного чертежа или же с 3D модели изделия. Пример спецификация представлен на рисунке 7.

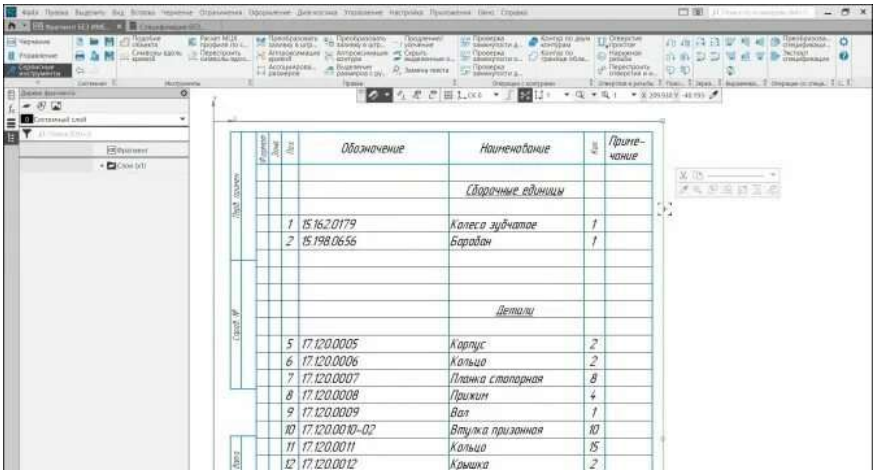


Рис. 7 – Спецификация

В результате проведенного исследования, можно сделать вывод, что сквозная автоматизация является очень важным темой в современном машиностроении. Она необходима для повышения эффективности проектирования изделий, существенного снижения времени на разработку необходимой документации и, как следствие, снижение стоимости разработки.

References

1. Бунаков, П. Ю. Сквозное проектирование в T-FLEX / П. Ю. Бунаков. — 3-е изд. — Саратов : Профобразование, 2024. — 396 c. — ISBN 978-5-4488-0128-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/145929.html (дата обращения: 01.03.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

2. Белов, П. С. САПР технологических процессов : учебное пособие / П. С. Белов, О. Г. Драгина. — 2-е изд. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2025. — 154 c. — ISBN 978-5-4497-3871-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/145175.html (дата обращения: 01.03.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3. Белов, П. С. Программирование ЧПУ для автоматизированного оборудования : учебное пособие для СПО / П. С. Белов, О. Г. Драгина, А. А. Бровченко. — Саратов, Москва : Профобразование, Ай Пи Ар Медиа, 2024. — 85 с. — ISBN 978-5-4488-1685-7, 978-5-4497-2355-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/132843.html (дата обращения: 01.03.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

4. Технологическое оборудование. Разработка технологических процессов изготовления деталей : учебное пособие для СПО / составители О. П. Куприянова, П. С. Белов, О. Г. Драгина. — Саратов, Москва : Профобразование, Ай Пи Ар Медиа, 2025. — 223 с. — ISBN 978-5-4488-2281-0, 978-5-4497-3724-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/143787.html (дата обращения: 02.04.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

5. Современные станки : учебное пособие / составители О. П. Куприянова, П. С. Белов, О. Г. Драгина. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2025. — 134 с. — ISBN 978-5-4497-4185-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/148679.html (дата обращения: 02.04.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

6. Технология машиностроения. Разработка технологических процессов изготовления деталей : учебное пособие / составители О. П. Куприянова, П. С. Белов, О. Г. Драгина. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2025. — 224 с. — ISBN 978-5-4497-3658-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/143174.html (дата обращения: 02.04.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

7. Технологическое оборудование. Современные станки : учебное пособие для СПО / составители О. П. Куприянова, П. С. Белов, О. Г. Драгина. — Саратов, Москва : Профобразование, Ай Пи Ар Медиа, 2025. — 133 с. — ISBN 978-5-4488-2464-7, 978-5-4497-4209-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/149181.html (дата обращения: 02.04.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

8. Белов, П. С. Разработка управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением : учебное пособие / П. С. Белов, О. Г. Драгина, А. А. Бровченко. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2024. — 86 с. — ISBN 978-5-4497-2332-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/132845.html (дата обращения: 14.09.2023). — Режим доступа: для авторизир. Пользователей

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 004.9:658.5

Varakin D.V. Design and development of a software complex for multi-variant operational planning using a scenario builder

Проектирование и разработка программного комплекса многовариантного планирования операций с конструктором сценариев

Varakin Daniil Vitalievich,
Master's student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA — Russian Technological University" (RTU MIREA), Moscow
Варакин Даниил Витальевич,
магистрант, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), г. Москва.

Abstract. *The article discusses theoretical and practical aspects of designing and developing a software system for multi-variant operational planning using a scenario builder. The relevance of implementing such systems is substantiated in the context of a dynamic environment and increasing uncertainty in managerial decision-making. The functional, organizational, and technical requirements for the system are analyzed, and the features of architectural design are considered. Particular attention is paid to supporting scenario analysis, data visualization, and integration of planning stages within a unified information environment. The proposed approach improves decision-making quality and operational management efficiency.*

Keywords: *multi-variant planning, scenario analysis, software system, information system, data visualization, decision support, system architecture*

Аннотация. *В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты проектирования и разработки программного комплекса, предназначенного для многовариантного планирования операций с использованием конструктора сценариев. Обоснована актуальность внедрения подобных систем в условиях высокой динамики внешней среды и роста неопределенности при принятии управленческих решений. Проведен анализ функциональных, организационных и технических требований к системе, а также рассмотрены особенности формирования архитектурного решения. Особое внимание уделяется обеспечению поддержки сценарного анализа, визуализации данных и интеграции различных этапов планирования в рамках единой информационной среды. Предложенный подход позволяет повысить обоснованность принимаемых решений и эффективность управления операционной деятельностью.*

Ключевые слова: *многовариантное планирование, сценарный анализ, программный комплекс, информационная система, визуализация данных, поддержка принятия решений, архитектура системы*

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

1. Введение

Из-за постоянных изменений на рынках и сложности процессов производства, компаниям всё труднее опираться на жёсткие планы. Линейные прогнозные модели уже не дают надёжных результатов - внешние условия меняются слишком быстро, и традиционные подходы не успевают под них подстраиваться. В таких условиях бизнесу

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

необходимы инструменты, которые позволяют оперативно рассматривать разные варианты развития событий и заранее оценивать возможные риски для каждого из них.

Оптимальным решением для данных проблем является сценарное планирование. Суть его заключается не в прогнозе, а в построении гибкой сетки альтернативных сценариев с детальным разбором рисков по каждому из них. Но внедрение данного подхода на практике нередко блокируется технологическим барьером: у аналитиков просто нет специализированного программного обеспечения, которое помогло бы быстро строить, сравнивать и дорабатывать сценарии внутри единой логики.

Я предлагаю сосредоточиться на создании программной среды, где основную роль играет интерактивный конструктор сценариев. С его помощью можно выстраивать систему прогнозирования и решать возникающие управленческие задачи. Ключевой эффект этого подхода состоит в том, что управленцы отходят от реагирования постфактум и начинают действовать на опережение, формируя ход событий заранее.

2. Функциональные требования к системе

Функциональные требования отражают состав и сущность базовых функций программного комплекса для поддержки процессов многовариантного планирования работ. Фундаментальной функцией системы выступает конструктор сценариев, формирующий альтернативные варианты сценария за счёт варьирования исходных данных, структуры расчётных моделей и связей между объектами системы.

Программное обеспечение обязано охватывать полный жизненный цикл сценариев - их создание, модификацию, сохранение, версионность и последующее сравнение, что позволяет пользователям проводить анализ альтернативных планов в едином информационном пространстве. Неотъемлемой частью выступает применение инструментов сценарного анализа (сравнение альтернативных сценариев по показателям результативности), анализ чувствительности переменных к факторам неопределённости и «что-если» анализ для моделирования последствий управленческих решений.

Важным условием является обеспечение автоматизированных вычислительных процедур с гарантией воспроизводимости результатов и минимизацией человеческого фактора при обработке данных. При этом алгоритмы расчётов должны быть параметризуемы для учёта предметной специфики.

Дополнительным нефункциональным требованием является обеспечение визуализации отчётов, которая должна включать в себя предоставление результатов в виде графиков, диаграмм и дашбордов для улучшения восприятия данных и облегчения интерпретации. Отчётность должна содержать стандартные и аналитические отчёты по сравнению сценариев и прогнозам.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3. Организационные и пользовательские требования

Организационные требования определяют порядок работы пользователей с программным продуктом и их роли в процессе планирования. Должен быть реализован контроль доступа, при котором пользователи будут иметь доступ только к тем функциям системы и данным, которые им требуются по должностным обязанностям.

Система должна обеспечивать разделение прав доступа по ролям (аналитик, руководитель, администратор) с определением уровня доступа к данным, прав на изменение и участия в процессах согласования. Не менее важно предусмотреть аудит системы через фиксацию действий пользователей, ведение истории изменений и реализацию контроля версий.

Не менее важно предусмотреть процедуры согласования и утверждения сценариев. Они должны быть регламентированы, включать поэтапное прохождение инстанций рассмотрения и принятия решений. Это повысит управляемость процесса планирования и снизит риск ошибок.

Дополнительно важно не забыть про пользовательский интерфейс - он должен быть интуитивным, с понятной навигацией и доступным для людей с разным уровнем технической подготовки. Это тоже влияет на то, насколько хорошо система приживётся в организации.

4. Технические требования к системе

Функциональные требования определяют архитектурные и технологические основы программного комплекса, гарантирующие его функциональную состоятельность. В сегодняшних условиях наиболее целесообразной является веб-ориентированная архитектура, которая позволяет реализовать многоканальный доступ к системе с любым терминалом и обеспечить одновременную работу большого количества пользователей.

К ключевым характеристикам системы можно добавить: гибкость (способность работать с растущими объемами данных и наращивать функционал без существенной перестройки архитектуры), скорость и стабильность (поддержка работы системы под нагрузкой). Необходимость интеграции с внешними информационными системами (ERP, корпоративные базы) позволяет автоматизировать импорт исходных данных и предотвращает дублирование информации.

Особую роль играет организация хранения данных с гарантией их целостности и согласованности (сценарии, параметры моделей, результаты расчетов, история изменений). Обязательными являются механизмы резервного копирования и восстановления данных, а также реализация средств информационной безопасности: аутентификация пользователей, разграничение прав доступа, аудит действий.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

5. Методические и управленческие аспекты

Важно не в простой замене программ, а в пересмотре самого принципа управления. Вместо стремления точно предугадать будущее акцент делается на анализе нескольких возможных сценариев. Такой подход снимает зависимость от единственного варианта развития событий: руководитель получает возможность заранее оценить риски и воздействовать на ситуацию, опираясь на систему ключевых показателей.

Преимущество системы в её гибкости. При необходимости модели можно быстро пересобрать под новые условия - например, если возникают перебои в поставках или меняется валютный курс. За счёт этого планирование перестаёт быть формальной процедурой и начинает выполнять практическую задачу: помогает согласовывать действия подразделений и удерживать их в рамках.

6. Сравнение с существующими подходами

Главная проблема большинства сегодняшних ИТ-решений для планирования - это их негибкость. Часто аналитик просто прикован к одной фиксированной модели, и чтобы сделать хоть шаг вперёд, нужно звать программистов или подключать какие-то внешние инструменты для картинок. В результате получается фрагментированная среда, состоящая из разных приложений, где данные постоянно теряются при переносе, а на всё это уходит много времени.

Мною же предлагаю архитектура, где всё - от генерации гипотезы до итогового дашборда - проходит внутри единого «движка». Научная новизна в том, что здесь сквозная интеграция: не просто модули рядом, а среда, где функциональные и технические требования объединены. Это закрывает саму возможность рассогласования данных, чем страдают почти все классические системы.

Заключение

Фактически мы приходим к тому, что без гибкого сценарного моделирования любая современная система планирования попросту непригодна. Предложенный подход к проектированию наглядно подтверждает - автоматизировать процесс принятия решений можно и нужно, причем так, чтобы глубина аналитики от этого только выиграла

Внедрение подобных систем дает компании самое ценное - свободу действий. В дальнейшем можно заняться внедрением в систему алгоритмов машинного обучения, чтобы программа не просто пересчитывала человеческие гипотезы, но и сама подсказывала самые надежные и прибыльные варианты, по сути, превращаясь в полноценного цифрового консультанта.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Асаул А. Н., Войтов И. В. Информационные технологии в управлении предприятием. — СПб. : Питер, 2021. — 256 с.

2. Балдин К. В., Уткин В. Б. Информационные системы в экономике. — М. : Дашков и К, 2020. — 395 с.

3. Баранов В. В. Моделирование и оптимизация бизнес-процессов. — М. : Финансы и статистика, 2019. — 312 с.

4. Гаврилов А. В. Поддержка принятия решений в информационных системах управления // Информационные технологии. — 2023. — № 5. — С. 45–52.

5. Глухов В. В. Экономика предприятия. — СПб. : Питер, 2022. — 512 с.

6. Емельянов С. В., Курейчик В. М. Теория систем и системный анализ. — М. : Юрайт, 2021. — 365 с.

7. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. — М. : Логос, 2020. — 296 с.

8. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. — М. : Наука, 2019. — 280 с.

9. Turban E., Sharda R., Delen D. Decision Support and Business Intelligence Systems. — 10th ed. — Boston : Pearson, 2021. — 720 p.

10. Laudon K. C., Laudon J. P. Management Information Systems: Managing the Digital Firm. — 16th ed. — Harlow : Pearson, 2020. — 640 p.

11. Power D. J. Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers. — Westport : Greenwood Publishing, 2021. — 304 p.

12. Автоматизация планирования на предприятии [Электронный ресурс]. — URL: https://www.economicportal.ru (дата обращения: 13.04.2026).

13. Сценарный анализ в управлении предприятием [Электронный ресурс]. — URL: https://cyberleninka.ru (дата обращения: 13.04.2026).

14. Системы поддержки принятия решений [Электронный ресурс]. — URL: https://habr.com (дата обращения: 13.04.2026).

15. 1С:ERP. Управление предприятием [Электронный ресурс]. — URL: https://1c.ru (дата обращения: 13.04.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

CONCLUSION

International Journal Of Professional Science №4(2) – 2026 demonstrates the breadth of contemporary scientific inquiry and the increasing significance of applied research in addressing the demands of a rapidly changing world. The materials included in this issue show that modern professional science is characterized by a close connection between theory and practice, where analytical rigor, technological innovation, and implementation-oriented thinking together define the quality and relevance of research outcomes.

A central conclusion emerging from the issue is that digital technologies have become a universal instrument of transformation across diverse fields. Whether in industrial monitoring, mine surveying, safety management, medical screening, educational formats, design engineering, or operational planning, digital systems are now essential to improving accuracy, efficiency, adaptability, and transparency. At the same time, the studies in this volume make clear that digitalization is most effective when combined with domain expertise, methodological precision, and a clear understanding of real-world operational contexts.

The issue also highlights the growing importance of resilience and safety in scientific and engineering practice. From aviation and industrial infrastructure to environmental protection, flood-prone construction areas, and healthcare systems, the need to anticipate risks and strengthen system reliability remains one of the defining themes of current research. The authors represented in this volume contribute valuable approaches for reducing uncertainty, improving preventive measures, and supporting informed professional decision-making.

Equally important is the issue's emphasis on sustainability and resource efficiency. Studies devoted to corrosion analysis, energy-efficient construction materials, LED lighting, equipment durability, land reclamation, and environmentally sensitive engineering solutions reflect a broader shift toward responsible technological development. These contributions confirm that progress in science and industry must increasingly be evaluated not only by productivity and performance, but also by long-term ecological and social consequences.

In summary, this issue of the journal makes a meaningful contribution to the advancement of interdisciplinary professional knowledge. It brings together research that is methodologically diverse, practically relevant, and responsive to the major technological and scientific challenges of our time. The published articles expand the horizons of academic discussion, stimulate further research, and provide a valuable basis for innovation in education, industry, healthcare, environmental management, and engineering practice.

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

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Electronic scientific editions

International journal of Professional Science

international scientific journal
№4(2)/2026

Please address for questions and comments for publication as well as suggestions for cooperation to e-mail address mail@scipro.ru

ISSN 2542-1085

Format 60x84/16. Conventional printed sheets 13,3
Circulation 100 copies
Scientific public organization
“Professional science”