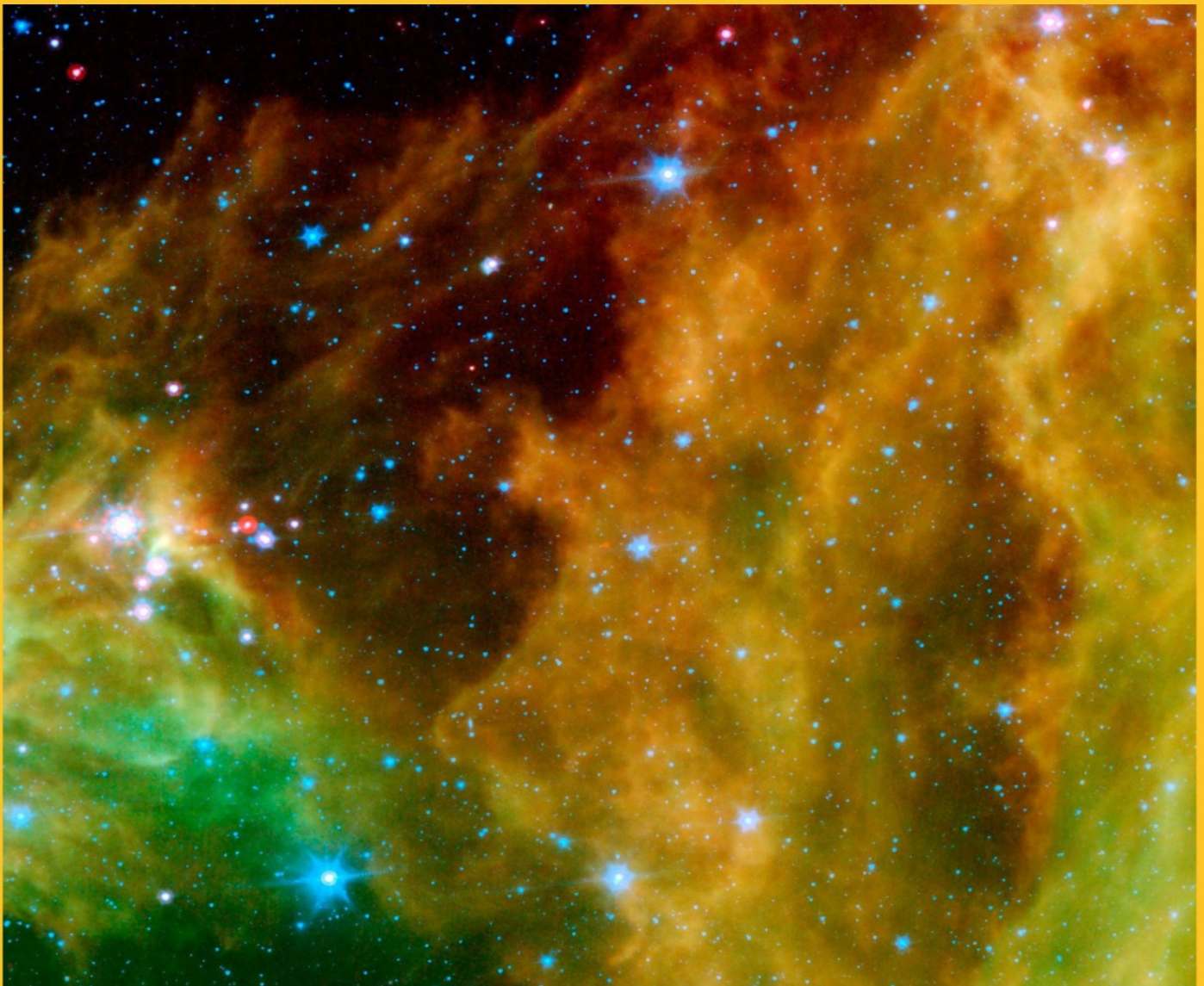


JULE 2026 | ISSUE #7(2)

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”, №7(2) - 2026. 124 p.

ISSN 2542-1085

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

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

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

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

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

UDC 001

LBC 72



Editorial team

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

Zhanar Zhanpeisova — Kazakhstan, PhD

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

Tursunov Dilmurat Abdullazhanovich — Kyrgyzstan, PhD, Osh State University

Ekaterina Petkova, Ph.D Medical University — Plovdiv

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

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

Editors N.A. Krasnova, 2026

Article writers, 2026

Scientific public organization
“Professional science”, 2026

Table of contents

INTRODUCTION	5
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION.....	6
Mirtovsky I.D. System Analysis of Approaches to Ensuring Consistency of Design and Regulatory Documentation in Architectural and Construction Projects.....	6
BIOLOGY AND BIOMEDICINE	13
Istomin M.A. Progressive fish feeding technologies: analysis of innovative approaches in modern aquaculture.....	13
CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE.....	21
Kuchin N.A., Lipkin M.S., Kalabin S.I., Khabibulin N.S. Analysis of corrosion mechanisms and monitoring methods for steel reinforcement in concrete.....	21
Poluboyarinov D.A. Mesoporous Carbon: Problems and Prospects of Equipment Design for Production.....	29
INDUSTRIAL RESEARCH AND PRODUCTION	35
Kostyuk I.A., Krasnova M.N. Physical model of abrasive grain interaction with the workpiece surface under conditions of high temperatures, pressures, and chemical affinity of materials	35
Rabtsevich V.A. Wire sweep investigation in TSSOP package manufacturing using high-temperature transfer molding	39
Zaykova V.I., Drabenko D.V. Analytical Review of Automated Control Systems for Conveyor-Based Production	48
SCIENTIFIC METHODS AND TECHNOLOGIES.....	55
Mihalkevits V.A. Dynamic particle interactive visualization algorithms to enhance user engagement.....	55
STANDARDIZATION AND QUALITY.....	65
Matveeva A.I., Antonova E.S., Antonov V.A. Gamification as a tool for increasing consumer engagement in the organization's performance evaluation system for quality management.....	65
Prytkova E.A. Intelligent quality management of technological processes based on decentralized cyber-physical systems	76
TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS	83
Gorbatov S.D., Pritulik M.A., Drabenko D.V. Artificial Intelligence in Urban Studies and Municipal Management	83
Krasnova M.N. Development of a universal reconfigurable assembly jig for aircraft wing panels	91
Petriankin A.V., Grodzenskiy Ya.S. Identity provider as a single point of compromise in zero trust network access architectures	99
TRANSPORT AND MOBILITY.....	112
Khalikov R.M., Nedoseko A.I., Pavlov S.Y., Glazachev A.O. Targeted increase in the impact resistance of concrete in the construction of culvert transport structures	112
CONCLUSION	123

INTRODUCTION

Issue 7(2) of the International Journal of Professional Science brings together research on current issues in modern professional science, engineering, technology, industrial ecology, quality management, and digital transformation. The articles presented reflect the interdisciplinary nature of scientific research and demonstrate the practical focus of research aimed at solving problems in construction, industry, transportation, biomedicine, materials science, and information security.

The architecture and construction section examines the consistency of design and regulatory documentation, which is particularly important for improving the quality and safety of construction projects. Materials on biology and biomedicine reveal innovative approaches to fish feeding in modern aquaculture. The chemistry and materials science section addresses the problems of reinforcement corrosion in concrete and the prospects for the production of mesoporous carbon.

Considerable attention is given to industrial research, industrial automation, digital visualization, intelligent quality management, and technological developments. The issue also includes articles on the use of artificial intelligence in urban planning, reconfigurable assembly fixtures in aerospace manufacturing, risks in zero-trust access architectures, and improving the impact resistance of concrete for transportation structures.

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

ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

UDC 004.9:69.05

Mirtovsky I.D. System Analysis of Approaches to Ensuring Consistency of Design and Regulatory Documentation in Architectural and Construction Projects

Системный анализ подходов к обеспечению согласованности проектной и нормативной документации в архитектурно-строительных проектах

Mirtovsky Ivan Dmitrievich,

postgraduate student,

Ivanovo State Power Engineering University named after V. I. Lenin,

Russia, Ivanovo

Миртовский Иван Дмитриевич,

аспирант,

Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина,

Россия, город Иваново

Abstract. The paper addresses the problem of ensuring consistency between design documentation and regulatory requirements in architectural and construction projects. It is shown that inconsistency constitutes a systemic risk affecting the validity of management decisions, schedules, and project costs. A classification of inconsistency types is proposed, and existing approaches to prevention and detection are systematized. A generalized three-level model is formulated, covering norm identification, currency control, and verification of design artifacts. Illustrative cases demonstrate typical scenarios in a multi-source regulatory environment. The need for intelligent decision support systems enabling end-to-end consistency control under evolving regulatory and design data is substantiated.

Keywords: architectural and construction project, regulatory documentation, design documentation, consistency, systems analysis, decision support, norm currency, project management

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения согласованности проектной и нормативной документации в архитектурно-строительных проектах. Показано, что рассогласованность между применяемыми нормативными требованиями и проектными решениями относится к классу системных рисков, влияющих на обоснованность управленческих решений, сроки и стоимость реализации проекта. Предложена классификация видов рассогласованности и систематизированы существующие подходы к их предотвращению и выявлению. Сформулирована обобщённая трёхуровневая модель обеспечения согласованности, включающая этапы идентификации норм, контроля актуальности и верификации соответствия проектных артефактов. На иллюстративных примерах продемонстрированы типовые сценарии возникновения рассогласованности в условиях многоисточниковой нормативной среды. Сделан вывод о необходимости интеллектуальных информационных систем, поддерживающих сквозной контроль согласованности в условиях эволюции нормативной базы и проектной документации. Результаты применимы при разработке методов и моделей интеллектуальной поддержки принятия решений в управлении архитектурно-строительными проектами.

Ключевые слова: архитектурно-строительный проект, нормативная документация, проектная документация, согласованность, системный анализ, поддержка принятия решений, актуальность норм, управление проектом

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

Архитектурно-строительный проект представляет собой сложную социотехническую систему, в которой одновременно формируются проектные решения, управленческие регламенты и комплект документации, подлежащий государственной экспертизе. Качество принимаемых решений в значительной степени определяется тем, насколько проектная документация согласована с действующими нормативными требованиями: сводами правил, строительными нормами и правилами, государственными стандартами, техническими регламентами и иными источниками нормативно-технической документации.

За последние годы объём и динамика изменений нормативной базы в строительной отрасли существенно возросли. Документы публикуются и актуализируются на ведомственных порталах, в реестрах Федерального автономного учреждения «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве», на сайтах Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии и на зеркальных информационных ресурсах. Метаданные одного и того же обозначения могут различаться по статусу, дате введения, ссылке на текст и перечню заменяемых документов. В проектной организации формируется локальный комплект документов, который развивается итерационно и часто опирается на нормативные ссылки, зафиксированные на более ранних этапах работ.

Рассогласованность между нормативным контуром и проектным контуром приводит к управленческим рискам: повторной проектной проработке, задержкам на экспертизе, росту издержек, снижению обоснованности решений по параметрам надёжности, энергоэффективности и безопасности объекта. С позиции специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации» указанная проблема интерпретируется как нарушение целостности информационной системы проекта, в которой нормативные и проектные артефакты связаны отношениями зависимости, версионности и ответственности.

Исследование выполняется в рамках разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений в управлении архитектурно-строительными проектами. Цель статьи — системный анализ подходов к обеспечению согласованности проектной и нормативной документации и формулирование обобщённой модели, применимой при проектировании интеллектуальных информационных систем данного класса. Для достижения цели решены задачи: раскрыть постановку проблемы с позиции системного анализа; предложить классификацию видов рассогласованности; систематизировать существующие подходы; сформулировать трёхуровневую модель; проиллюстрировать типовые сценарии.

Системный анализ архитектурно-строительного проекта предполагает рассмотрение совокупности взаимосвязанных элементов: целей заказчика, организационной структуры проектной команды, графика работ, бюджета, проектных артефактов и внешней нормативной среды. Формально проект можно представить как систему $S = (P, N, R, V)$, где P — множество проектных положений; N — множество нормативных положений; R — отношения «опирается на», «заменяет», «уточняет», «противоречит»; V — множество версий артефактов и норм, изменяющихся во времени.

Согласованность системы означает выполнение инвариантов: каждое существенное проектное положение, зависящее от нормы, связано с актуальной версией соответствующего нормативного положения; не существует пар элементов, для которых выполняется отношение противоречия при одновременном статусе «применяется»; изменение нормы инициирует пересмотр затронутых проектных положений в управляемые сроки. На практике инварианты нарушаются из-за фрагментации нормативной информации, различия программных сред и ответственных ролей, длительного жизненного цикла проекта и междисциплинарных расхождений.

Для целей системного анализа и последующей автоматизации целесообразно различать виды рассогласованности (табл. 1).

Таблица 1

Классификация видов рассогласованности проектной и нормативной документации

Тип рассогласованности	Содержание	Типовой пример
Актуальность	В проекте указана норма устаревшей редакции	Ссылка на свод правил до вступления изменения
Полнота	Применимая норма не учтена в разделе	Не отражены требования по пожарным отсекам
Внутрипроектная	Противоречие между разделами документации	Несовпадение отметок архитектурного и конструктивного разделов
Нормативная	Применение документа с некорректным статусом	Использование отменённого документа без обоснования
Версионная	Несоответствие версии текста нормы и ссылки	Файл одной редакции при ссылке на иную
Организационная	Разные подразделения опираются на разные источники	Разные перечни сводов правил у сметчиков и составителей ПОС

Выделенные типы не являются взаимоисключающими. Для управления рисками целесообразно оценивать критичность расхождения — влияние на безопасность, обязательность устранения на экспертизе, трудоёмкость исправления.

Существующие практики обеспечения согласованности проектной и нормативной документации группируются в пять классов (табл. 2).

Таблица 2

Систематизация подходов к обеспечению согласованности

Класс подхода	Суть	Сильные стороны	Ограничения
Организационно-процессные	Регламенты, экспертиза, координация информационного моделирования	Формализованная ответственность	Высокая трудоёмкость
Документальные	Единый комплект, стандарты оформления	Единообразие представления	Не гарантируют актуальность норм
Информационные	Библиотеки НТД, среды общих данных, реестры	Централизация источников	Фрагментация между источниками
Экспертные	Чек-листы, внутренняя экспертиза разделов	Учёт контекста объекта	Субъективность
Автоматизированные	Правила в информационной модели, интеллектуальная поддержка решений	Масштабируемость	Требуют формализации знаний

Организационно-процессные подходы опираются на положения Градостроительного кодекса Российской Федерации и требования к составу и содержанию проектной документации. Процедуры, ориентированные на информационное моделирование зданий, расширяют проверку согласованности на геометрические и атрибутивные коллизии, однако не всегда охватывают полный нормативный контур. Информационные подходы реализуются через корпоративные библиотеки нормативных документов и ведомственные реестры; агрегация данных из нескольких источников остаётся нетривиальной задачей. Автоматизированные подходы наиболее перспективны с точки зрения системного анализа, поскольку позволяют закладывать инварианты согласованности в информационную систему и формировать рекомендации для лица, принимающего решение.

На основе проведённого анализа предлагается трёхуровневая модель обеспечения согласованности. Уровень 1 — идентификация применимых норм: для объекта определяется множество релевантных нормативных документов с учётом вида работ, стадии и функционального назначения здания. Уровень 2 — контроль актуальности и статуса: выявляются события введения изменений, отмены и замены; события классифицируются по критичности. Уровень 3 — верификация соответствия проектных артефактов: нормоконтроль, междисциплинарная координация, параметрические проверки, перспектива интеллектуального анализа текстов разделов. Модель замыкается обратной связью: решения руководителя проекта влияют на состав применимых норм и приоритеты контроля.

Кейс 1. На стадии проектной документации в конструктивном разделе зафиксирована ссылка на свод правил в редакции, действовавшей на момент выпуска комплекта. Через несколько месяцев опубликована новая редакция с изменением расчётных коэффициентов. Организация продолжает выпуск рабочей документации, опираясь на локальный файл прежней редакции. Тип рассогласованности: актуальность и версионная. Управленческое следствие — риск замечаний на экспертизе и пересчёта конструкций; событие должно перехватываться на уровне 2 модели.

Кейс 2. При сопоставлении метаданных одного обозначения свода правил в реестре Федерального автономного учреждения «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве» и на ведомственном портале статусы или ссылки на текст различаются. Проектировщики разных отделов выбирают разные источники. Тип: организационная и нормативная. Требуется политика приоритета источников и канонизация метаданных — задача уровней 1–2.

Кейс 3. В проекте жилого комплекса с подземной автостоянкой раздел по пожарной безопасности не учитывает требования отдельного свода правил для подземных автостоянок. Тип: полнота. Выявление возможно при сопоставлении перечня применимых норм для типа объекта с фактическими ссылками в разделах (уровень 3).

Предложенная классификация и модель дополняют действующие регламенты проектирования и экспертизы системно-аналитическим аппаратом. Сравнительный анализ показывает, что ни один класс подходов в изоляции не обеспечивает устойчивой согласованности в условиях частых изменений нормативно-технической документации. Перспективным является интеграция трёхуровневой модели в архитектуру интеллектуальной системы поддержки принятия решений, включая подсистему агрегации метаданных нормативных документов из разнородных источников. Методологически близким является подход инкрементальной проверки согласованности при эволюции системы, при котором контроль затрагивает только изменённые элементы и их зависимости.

Ограничения исследования связаны с теоретико-методическим характером обзора. Дальнейшие работы предполагают экспериментальную оценку модели, разработку метрик согласованности и интеграцию с средой информационного моделирования.

Таким образом, системный анализ подходов к обеспечению согласованности проектной и нормативной документации позволяет сформулировать требования к интеллектуальным информационным системам в архитектурно-строительной отрасли:

поддержка многоуровневого контроля, работа с версиями и статусами, трассируемость связей «норма — проектное положение — управленческое решение», а также интеграция с практикой информационного моделирования без подмены нормативного контроля геометрической координацией модели.

Трёхуровневая модель, предложенная в настоящей работе, согласуется с жизненным циклом архитектурно-строительного проекта. На ранних стадиях доминирует идентификация применимого нормативного корпуса; в фазе активной разработки документации возрастает значение верификации соответствия разделов; в период внесения изменений по замечаниям экспертизы или заказчика критичным становится оперативный контроль актуальности норм. Инкрементальный принцип контроля, при котором пересматриваются только затронутые изменением элементы и их зависимости, снижает трудоёмкость сопровождения по сравнению с полной повторной проверкой комплекта.

С точки зрения обработки информации особую сложность представляет многоисточниковая нормативная среда. Один и тот же документ может фигурировать в ведомственном реестре, в корпоративной библиотеке проектной организации и в локальном архиве файлов в формате переносимого документа. Расхождение метаданных между источниками порождает организационную рассогласованность ещё до появления содержательной ошибки в проектном решении. Поэтому информационные системы поддержки проектных решений должны включать не только модуль поиска норм, но и механизм канонизации сведений: выбора авторитетного источника, фиксации приоритетов, сохранения ручных корректировок эксперта при обновлении данных.

Обеспечение согласованности проектной и нормативной документации имеет прямое отношение к управлению архитектурно-строительным проектом как к процессу принятия решений в условиях неполной и динамически изменяющейся информации. Руководитель проекта, главный инженер проекта и специалисты нормоконтроля оперируют не отдельными документами, а сетью взаимосвязанных артефактов, для которых критичны как содержательные параметры, так и метаданные: дата, статус, источник, область применения. Отсюда следует, что задача согласованности не сводится к формальной проверке наличия ссылок в тексте раздела; она включает верификацию того, что выбранная норма действительно применима к объекту, не отменена и соответствует стадии проектирования.

В статье выполнен системный анализ проблемы согласованности проектной и нормативной документации в архитектурно-строительных проектах. Предложены классификация шести типов рассогласованности, обзор пяти классов подходов и

трёхуровневая модель. Сделан вывод о необходимости интеллектуальных информационных систем, обеспечивающих сквозной контроль согласованности в условиях эволюции нормативной базы и проектной документации.

References

1. Волк Р., Штенгель Ю., Шульцманн Ф. Информационное моделирование зданий для существующих объектов — обзор литературы и перспективы // Автоматизация в строительстве. — 2014. — Т. 38. — С. 109–127.
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 2024).
3. ГОСТ Р 21.101-2020. Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации. — М.: Стандартинформ, 2021.
4. Дубровин В. И., Колпакова Т. А., Козлов А. В. Поддержка принятия решений в управлении строительными проектами // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2010.
5. Емельянова О. В., Косяков С. В. Информационные технологии в управлении инвестиционно-строительными проектами: учебное пособие. — Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2018.
6. Истман Ч., Тайхольц П., Сэкс Р., Листон К. Справочник по информационному моделированию зданий. — 3-е изд. — Wiley, 2018. — 606 с.
7. Миротовский И. Д. Метод инкрементальной проверки согласованности архитектурных артефактов при эволюции программных систем // Материалы конференции «Энергия». — 2025.
8. Организация и оцифровка информации о зданиях и сооружениях, включая информационное моделирование зданий. Часть 1. Понятия и принципы: ISO 19650-1:2018.
9. Постановление Правительства Российской Федерации от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» (ред. от 2024).
10. Свод правил 48.13330.2019 «СНиП 12-01-2004. Организация строительства» (с изменениями). — М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2020.
11. Трахтенберг И. М. Системный анализ в строительстве: учебное пособие. — М.: Академия строительства и архитектуры, 2019.
12. Чернышов С. А. Информационное моделирование в строительстве: учебное пособие. — М.: Юрайт, 2021.

BIOLOGY AND BIOMEDICINE

UDC 639.3.043

Istomin M.A. Progressive fish feeding technologies: analysis of innovative approaches in modern aquaculture

Прогрессивные технологии кормления рыбы: анализ инновационных подходов в современной аквакультуре

Istomin Maxim Anatolyevich

3rd student, part-time education, specialty 36.03.02 Animal Science,
Ural State Agrarian University,
Russia, Yekaterinburg

Scientific supervisor: **Galiev Danis Minniyanovich,**

PhD in Agricultural sciences, Senior Lecturer
Ural State Agrarian University, Russia, Yekaterinburg

Истомин Максим Анатольевич
студент 3 курса, заочной формы обучения, специальность 36.03.02 Зоотехния, ФГБОУ ВО
«Уральский государственный аграрный университет»,
Россия, г. Екатеринбург

Научный руководитель: Галиев Данис Миннианович,
кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет»,
Россия, г. Екатеринбург

Abstract. The aim of this study is to analyze and systematize progressive fish feeding technologies in industrial aquaculture. The methodology is based on a synthesis of scientific and technical literature, data from the production experience of Russian and foreign fish farms, and an analysis of the results of the introduction of innovative feed components and automated systems. The article examines extruded feeds, alternative protein sources (insects and algae), plant-based immunostimulants, cyber-physical automatic feeding systems, and integrated aquaponics units. It has been established that the integrated use of these technologies can reduce the feed conversion ratio, increase fish survival rates, cut feed consumption by 9-10%, and minimize environmental impact. It is concluded that further research is needed to optimize extruded feed formulations incorporating alternative protein components.

Keywords: aquaculture, extruded feeds, automatic feeding, cyber-physical system, alternative protein sources, immunostimulants, aquaponics

Аннотация. Цель работы – анализ и систематизация прогрессивных технологий кормления рыбы в промышленной аквакультуре. Методология основана на обобщении научно-технической литературы, данных о производственном опыте российских и зарубежных рыбоводческих хозяйств, а также на анализе результатов внедрения инновационных кормовых компонентов и автоматизированных систем. В статье рассмотрены экструдированные корма, альтернативные источники белка (насекомые и водоросли), иммуностимуляторы растительного происхождения, киберфизические системы автоматического кормления и интегрированные аквапонные установки. Установлено, что комплексное применение данных технологий позволяет снизить кормовой коэффициент, повысить выживаемость рыбы, сократить расход кормов на 9–10% и минимизировать воздействие на окружающую среду. Сделан вывод о необходимости дальнейших исследований в области оптимизации рецептур экструдированных комбикормов с включением альтернативных белковых компонентов.

Ключевые слова: аквакультура, экструдированные корма, автоматическое кормление, киберфизическая система, альтернативные источники белка, иммуностимуляторы, аквапоника

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

Введение. Аквакультура является одним из наиболее динамично развивающихся секторов мирового агропромышленного комплекса, обеспечивающим растущий спрос на рыбную продукцию на фоне сокращения естественных биоресурсов. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО) сообщает, что более половины мировых поставок рыбы и моллюсков в настоящее время приходится на аквакультуру, а к 2050 году глобальный спрос на морепродукты оценивается в 270 млн тонн [2, с. 7].

Кормление составляет 50–70% всех операционных затрат в рыбоводстве, что определяет актуальность разработки и внедрения технологий, направленных на повышение эффективности использования кормов, улучшение здоровья рыб и обеспечение экологической устойчивости производства. Традиционные методы кормления, включая ручную раздачу и простейшие автоматические кормушки, имеют существенные недостатки: неравномерное распределение корма, отсутствие адаптации к изменяющимся условиям среды, высокий риск перекорма и, как следствие, загрязнение водоемов несъеденными остатками.

Целью настоящей работы является анализ и систематизация прогрессивных технологий кормления рыбы в промышленной аквакультуре с выделением их особенностей и оценкой эффективности.

Задачи исследования:

1. охарактеризовать современные кормовые технологии (экструдирование, альтернативные источники белка, иммуностимуляторы);
2. проанализировать системы автоматизации процессов кормления, включая киберфизические системы;
3. рассмотреть интеграционные подходы (аквапоника) как фактор повышения экологической устойчивости рыбоводства.

Материалы и методы. Материалом для исследования послужили научные публикации в рецензируемых журналах за период 2020–2026 гг. [1–7], данные производственных испытаний [6, 7], результаты внедрения инновационных технологий в рыбоводческих хозяйствах России и зарубежных стран.

Методологическая база исследования включает: метод сбора и обработки информации (анализ научно-технической литературы, нормативно-технической документации); метод анализа и сравнения (сопоставление показателей эффективности различных технологий кормления); метод обобщения (систематизация результатов исследований и формулирование выводов) [2, с. 15].

Анализ проведен по пяти технологическим направлениям современной аквакультуры: экструдированные корма, альтернативные источники белка, иммуностимуляторы, автоматизация кормления (киберфизические системы), интегративные аквапонные технологии.

Результаты и обсуждение. Экструдирование является одной из важнейших технологических операций при производстве комбикормов для аквакультуры, которая позволяет значительно повысить усвояемость питательных веществ корма.

Экструзия (extruding) – влажное прессование с взрывом. Технологический процесс заключается в гидробаротермической обработке сырья, когда кормовая масса прессуется и под высоким давлением выталкивается через фильеры в область атмосферного давления, после чего взрывается, увеличиваясь в объеме. К преимуществам экструзии относится возможность обработки любого сырья индивидуально или в различных композициях. По сравнению с другими способами влаготепловой обработки экструзия дает более ощутимое повышение питательности исходного сырья. Одним из главных ее эффектов является резкое возрастание переваримости углеводов – наименее доступной для животных части кормового сырья [9, с. 212].

В процессе экструзии кормовая смесь подвергается воздействию высокого давления и температуры, что приводит к глубоким физико-химическим изменениям.

По данным исследований, в результате экструдирования количество крахмала в кормовой смеси уменьшается на 36,9%, сырого протеина – на 3,1%, сырой клетчатки – на 4,3%, при этом количество водорастворимых углеводов возрастает в 5,5 раза, что существенно повышает переваримость питательных веществ [1, с. 42]. Ключевыми факторами, влияющими на качество экструдированного корма, являются температура экструдирования, влажность сырья и частота вращения шнека экструдера [1, с. 45].

Наиболее эффективные рецептуры экструдированных продукционных комбикормов для ценных видов рыб (судак, нефритовый окунь, щука) содержат протеин в диапазоне 41,8–44,8%, сырой жир – 14,2–15,2%. Кормовой коэффициент при использовании таких кормов составляет для судака 1,8 ед., для окуня – 1,5 ед., для щуки – 1,9 ед. при нормативной выживаемости рыбы [1, с. 46].

Таблица 1

Сравнительная характеристика традиционных и экструдированных кормов

Показатель	Традиционные гранулированные корма	Экструдированные корма
Степень усвоения протеина, %	70–75	85–92
Содержание водорастворимых углеводов (относит.ед.)	1	5,5
Потери питательных веществ в воду, % от объема корма	до 30	5–10
Водостойкость гранул (время до размягчения)	5–15 мин	более 60 мин
Кормовой коэффициент (по карпу)	1,8–2,2	1,2–1,5

Традиционный источник белка – рыбная мука – характеризуется высокой стоимостью и ограниченностью ресурсов, что стимулирует поиск альтернативных компонентов [3, с. 66]. Рыбную муку используют для обогащения комбикормов и рационов питания при откорме сельскохозяйственных домашних животных, крупного рогатого скота, птицы и рыбы, а также для профилактики их заболеваний. Рыбную муку вводят в комбикорма для сбалансирования рецептур по содержанию сырого протеина, аминокислотному и жирнокислотному составу, по уровню кальция и фосфора, а также обменной энергии. Жирные кислоты Омега-3 увеличивают в организме количество гормона прогестерона, повышающего его репродуктивные характеристики.

Личинки черной львинки (*Hermetia illucens*) содержат до 45% белка и 35% жира, отличаются оптимальным аминокислотным профилем и способностью перерабатывать органические отходы. Исследования Донского государственного технического университета подтвердили эффективность замены импортных компонентов кормов продуктами переработки насекомых, что позволяет снизить издержки хозяйств до 10% (около 650 тыс. рублей в год для ферм, производящих до 20 т форели) [6]. Белки из насекомых быстро усваиваются личинками рыб, ускоряя их рост и полноценное развитие. В Европейском союзе с 2017 года официально разрешено использование белков из насекомых в кормах для аквакультуры [3, с. 70].

Микроводоросли (например, *Schizochytrium* sp.) содержат до 50% жира, значительная часть которого представлена полиненасыщенными жирными кислотами омега-3. Исследования показывают, что водоросли могут заменить до 50% рыбной муки в кормах без ущерба для роста и здоровья рыб. Водоросли легко выращиваются в контролируемых условиях, что снижает зависимость от морских экосистем [4, с. 22].

Современные подходы к профилактике заболеваний в аквакультуре все больше ориентируются на использование природных иммуностимуляторов вместо антибиотиков. Иммунитет рыб, особенно на ранних стадиях развития, напрямую влияет на выживаемость и темпы роста. Многие кормовые добавки не только улучшают здоровье рыб, но и повышают скорость роста и накопление массы. В последние годы все больше внимания уделяется использованию растительных компонентов в качестве иммуностимуляторов для объектов аквакультуры, включая пребиотики, пробиотики, синбиотики, лекарственные растения и органические кислоты. Эти добавки являются экологически чистой альтернативой синтетическим химическим веществам и способствуют устойчивому развитию аквакультуры [10, с. 86].

Учеными Волгоградского государственного технического университета разработана киберфизическая система, использующая датчики для отслеживания температуры воды, уровня pH и содержания растворенного кислорода. Опираясь на

текущие параметры, система корректирует объем и время выдачи корма в соответствии с потребностями рыб [7, с. 124].

Практические испытания и последующее внедрение киберфизической системы в условиях реального рыбоводного хозяйства позволили получить следующие значимые результаты. Во-первых, зафиксировано сокращение еженедельного потребления комбикорма с 950 кг до 860 кг, что соответствует экономии около 9,5% от первоначального объема. Такое снижение стало возможным благодаря точному дозированию и своевременной подаче корма, исключая перекорм и потери питательных веществ. Во-вторых, система кардинально сократила временные затраты на мониторинг состояния одного пруда: если при традиционном подходе оператору требовалось около 17 минут для визуального осмотра, измерения параметров и принятия решения о кормлении, то с внедрением КФС этот процесс занимает не более 5 секунд. Освободившееся время персонал может направить на решение других производственных задач. В-третьих, система автоматически генерирует рекомендации по содержанию прудов в тех случаях, когда один или несколько параметров качества воды (например, содержание растворенного кислорода, уровень pH, температура или концентрация аммиака) превышают установленные критические пороги. Такие оповещения помогают предотвратить стресс и гибель рыбы, а также своевременно скорректировать режим кормления или водоподготовки.

Киберфизическая система для аквакультуры представляет собой комплексное решение для оптимизации рыбоводных хозяйств. Она основана на сборе и анализе ключевых экологических параметров через систему датчиков мониторинга воды. В отличие от традиционных методов, ручного или по расписанию, эта технология позволяет не только анализировать текущее состояние прудового хозяйства в реальном времени, но и прогнозировать его будущую продуктивность.

Алгоритм работы киберфизической системы автоматического кормления был разработан и успешно апробирован. Результаты исследований были представлены на Международной российской конференции по умной промышленности (SmartIndustryCon), а полная версия работы опубликована в ведущей мировой цифровой библиотеке IEEE Xplore. Данная публикация подтверждает высокий научный уровень разработки и ее потенциальную значимость для отрасли.

Компания AQ1 разработала систему, основанную на пассивном акустическом мониторинге (PAM). Система использует гидрофоны для записи звуков, издаваемых креветками во время кормления. Анализ этих звуков позволяет точно определить активность кормления и соответственно регулировать подачу корма, что способствует

снижению потерь и улучшению кормового коэффициента. Эта технология была успешно внедрена на креветочных фермах в Таиланде и Малайзии [11].

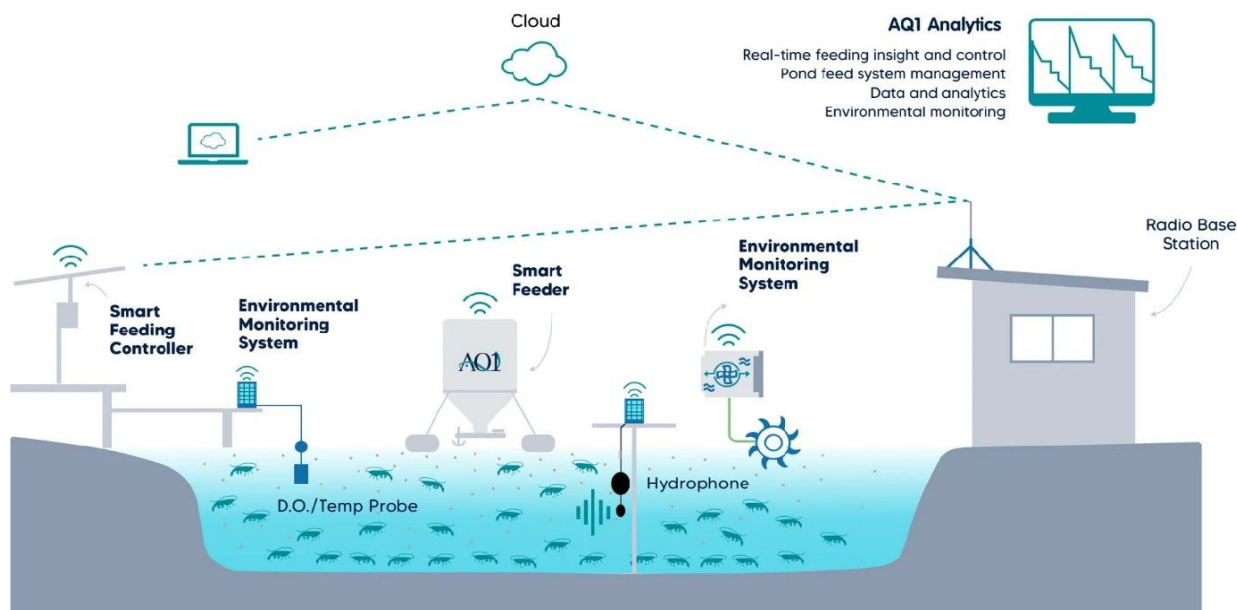


Рисунок 1. Акустическая системы кормления AQ1 Systems (Австралия)

Аквапоника представляет собой высокотехнологичный способ ведения сельского хозяйства, сочетающий аквакультуру (выращивание рыбы) и гидропонику (выращивание растений без грунта). Принцип аквапоники основан на симбиозе: отходы жизнедеятельности рыб обеспечивают питательными веществами растения, а растения очищают воду, что создает замкнутую экосистему [5, с. 123]. Аквапоника – (лат. aqua – вода, греч. πόνοϛ – работа) – это новая высокотехнологичная сельскохозяйственная технология, которая сочетает в себе как выращивание растительной продукции, так и производство продукции рыбной. Это взаимосвязанная гибридная система прудового хозяйства и гидропоники.

Суть метода – в использовании отходов жизнедеятельности водных животных (рыб, креветок) в качестве питательной среды для растений. Водные животные выделяют токсичные для них самих продукты жизнедеятельности: азотистые, калийные, фосфорные соединения, углекислый газ.

Исследования показывают, что в аквакультуре до 70–75% кормов уходит в твердой, растворенной или газообразной формах, и аквапонные системы позволяют эффективно утилизировать эти питательные вещества. Российско-белорусским коллективом ученых разработана аквапонная установка с электрохимической обработкой воды, позволившая повысить урожайность микрозелени более чем на 30% при обеспечении повторного использования воды в рыбоводных бассейнах [8].

Каскадные аквапонные системы обеспечивают благоприятные условия выращивания растений и рыб при значительном снижении стоимости монтажа конструкции и затрат на ее обслуживание.

Заключение. На основе проведенного анализа прогрессивных технологий кормления рыбы в современной аквакультуре можно сделать следующие выводы.

Экструдированные корма по праву считаются одной из наиболее эффективных технологий кормопроизводства для объектов аквакультуры. В основе метода лежит обработка сырья под высоким давлением и температурой с последующим резким сбросом давления, что приводит к глубоким физико-химическим изменениям компонентов кормовой смеси. Благодаря такому воздействию происходит желатинизация крахмала, денатурация белков и инактивация антипитательных веществ, что в совокупности обеспечивает значительное повышение усвояемости питательных веществ организмом рыбы. Как показывают производственные испытания, применение экструдированных кормов позволяет снизить кормовой коэффициент до значений 1,2–1,5 единицы для карповых видов, тогда как при использовании традиционных гранулированных кормов этот показатель обычно составляет 1,8–2,2. Кроме того, экструдирование существенно улучшает физические свойства кормов: гранулы приобретают высокую водостойкость, сохраняя форму и питательную ценность в воде более 60 минут. Это предотвращает преждевременное вымывание питательных веществ и загрязнение водной среды, а также позволяет рыбе полностью потреблять корм без потерь.

Альтернативные источники белка (личинки черной львинки, водоросли) позволяют замещать до 50% рыбной муки в рационах без потери продуктивности, снижая себестоимость кормов на 10% и способствуя переработке органических отходов.

Иммуностимуляторы растительного происхождения (пробиотики, лекарственные растения) являются эффективной альтернативой антибиотикам, повышая выживаемость рыб и устойчивость к стресс-факторам при сохранении экологической чистоты продукции.

Киберфизические системы автоматического кормления позволяют сократить расход корма на 9–10%, уменьшить временные затраты на мониторинг с 17 мин до 5 с на пруд и автоматически корректировать режимы кормления по параметрам качества воды.

Интеграция с аквапоникой решает проблему накопления органических отходов (утилизировав 70–75% кормовых остатков) и повышает общую рентабельность производства за счет дополнительного урожая растений.

References

1. Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Хлыстунов В.Ф. Экструдирование кормов для аквакультуры (обзор) // Таврический вестник аграрной науки. – 2021. – № 1. – С. 38–49. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-1-25-38-49
2. Егоров Б.В., Фигурская Л.В. Возможности использования малоценной рыбы в кормопроизводстве // Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького. – 2015. – Том 17. – № 3 (63). – С. 66–72
3. Бектурсунова М.Ж., Сидорова В.И., Жиенбаева С.Т., Машенцева Н.Г., Асылбекова С.Ж. Разработка технологии экструдированных продукционных комбикормов для рыб, выращиваемых в промышленных условиях // CyberLeninka. – 2023
4. Brigida A.V., Kitaev I.A., Shishanov G.A. Use of immunostimulants and biologically active substances in fish farming // Ветеринария и кормление. – 2024. – № 6. – С. 21–24. ISSN 1814-9588
5. Yousefi M. Применение природных иммуностимуляторов для улучшения здоровья, продуктивности и биологической борьбы с болезнями рыб // РУДН. – 2024
6. Тевяшов Г.К. Киберфизические системы в аквакультуре // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «ЦИФРОВИЗАЦИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА». – Тамбов: ТГТУ, 2024. – Т. 2. – С. 123–126
7. Кравец А.А., Борзин Р.А. Cyber-Physical Systems in Pond Aquaculture // IEEE Xplore. – 2024. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515802
8. Юрин Д.А., Максим Е.А., Дубов В.Е., Ярмоц А.В., Ашинов Ю.Н. Каскадная аквапонная система, повышающая эффективность выращивания растений и рыб // CyberLeninka. – 2023
9. Киреев С.В., Штепа В.Н., Козырь А.В., Шикунец А.А. Создание технологии, повышающей урожайность микрозелени на 30% // Пензенский государственный университет. – 2024
10. Российские ученые подтвердили эффективность замены импортного корма для рыб // Fishnet.ru. – 2024. – 12 декабря
11. Альтернативные корма для рыбоводства: использование водорослей и насекомых // Свое Фермерство. – 2024. – 2 августа

CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE

UDC 620.197

Kuchin N.A., Lipkin M.S., Kalabin S.I., Khabibulin N.S. Analysis of corrosion mechanisms and monitoring methods for steel reinforcement in concrete

Анализ механизмов коррозии и методов мониторинга стальной арматуры в бетоне

Kuchin N.A.,

Postgraduate Student, Department of Chemical Engineering
Doctor of Engineering, Head of the Department of Chemical Engineering,
South-Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov,
Novocherkassk

Lipkin M.S.,

Doctor of Engineering, Head of the Department of Chemical Engineering

Kalabin S.I.,

Postgraduate Student, Department of Chemical Engineering

Khabibulin N.S.,

Bachelor of Science, Department of Chemical Engineering

Кучин Н.А.,

Аспирант кафедры химических технологий
д.т.н., зав.каф. химических технологий, Южно-Российский
государственный политехнический университет имени М.И. Платова,
г. Новочеркасск,

Липкин М.С.,

д.т.н., зав.каф. химических технологий,

Калабин С.И.,

Аспирант кафедры химических технологий

Хабибулин Н.С.,

Бакалавр кафедры химических технологий

Abstract. This article presents a systematic analytical review of current scientific and applied understanding of the mechanisms of corrosion failure of steel reinforcement in concrete structures. Key factors in steel depassivation – concrete stone carbonation and chloride attack – are examined in detail, as well as the role of crack formation in accelerating corrosion processes. Special attention is given to the classification and comparative effectiveness of corrosion monitoring and control methods: visual, measuring, non-destructive (ultrasound, ground-penetrating radar, thermography, electromagnetic flaw detection), and electrochemical. It is shown that electrochemical methods are the most informative and quantitative, allowing for the assessment of the instantaneous corrosion rate, the risk of localized reinforcement failure, and the residual service life of the structure. Practical recommendations for selecting optimal inspection schemes depending on operating conditions are offered.

Keywords: reinforcement corrosion, concrete, chlorides, carbonation, pitting, monitoring methods, non-destructive testing, electrochemical impedance spectroscopy, residual service life.

Аннотация. В статье представлен систематический аналитический обзор современных научных и прикладных представлений о механизмах коррозионного разрушения стальной арматуры в бетонных

конструкциях. Подробно рассмотрены ключевые факторы депассивации стали – карбонизация бетонного камня и хлоридная агрессия, а также роль трещинообразования в ускорении коррозионных процессов. Отдельное внимание уделено классификации и сравнительной эффективности методов мониторинга и контроля коррозии: визуальному, измерительному, неразрушающему (ультразвук, георадар, термография, электромагнитная дефектоскопия) и электрохимическому. Показано, что наиболее информативными и количественными являются электрохимические методы, позволяющие оценить мгновенную скорость коррозии, риск локального разрушения арматуры и остаточный ресурс конструкции. Предложены практические рекомендации по выбору оптимальных схем обследования в зависимости от условий эксплуатации.

***Ключевые слова:** коррозия арматуры, бетон, хлориды, карбонизация, питтинг, методы мониторинга, неразрушающий контроль, электрохимическая импедансная спектроскопия, остаточный ресурс.*

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

Введение

Коррозия стальной арматуры остаётся одной из наиболее острых проблем современного строительства и эксплуатации инфраструктурных объектов. Железобетонные конструкции составляют основу мостов, путепроводов, тоннелей, промышленных зданий, гидротехнических сооружений и жилых комплексов. Преждевременное разрушение этих объектов не только влечёт колоссальные экономические потери, но и создаёт прямую угрозу безопасности населения. По данным Росавтодора, около 13% мостовых сооружений на региональных дорогах России находятся в аварийном или предаварийном состоянии 11. В США, согласно отчёту E&N Bridges 2025, около 6,7% мостов классифицируются как «структурно-дефектные», при этом основной причиной дефектов признаётся именно коррозия арматуры 22.

Особая сложность проблемы обусловлена скрытым, латентным характером коррозионных процессов. Армирующий металл расположен внутри бетонного тела, и его деградация часто не имеет внешних проявлений вплоть до критической стадии, когда восстановление конструкции становится невозможным или экономически нецелесообразным. Традиционные периодические осмотры не всегда позволяют своевременно выявить начальные стадии разрушения. В связи с этим возрастает потребность в систематизации знаний о механизмах коррозии и разработке эффективных методов инструментального мониторинга, позволяющих получать достоверную количественную информацию о состоянии арматуры без нарушения целостности бетона.

Цель данной работы – комплексный анализ современных данных о физико-химических механизмах коррозии арматуры в бетоне, классификация и сравнительная оценка существующих методов контроля, а также выработка рекомендаций по их рациональному сочетанию для различных эксплуатационных условий.

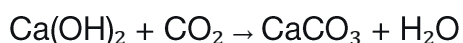
1. Механизмы коррозии арматуры: термодинамические и кинетические аспекты

В свежеприготовленном бетоне поровая жидкость обладает сильнощелочной реакцией (pH 12,5–13,8) благодаря присутствию гидроксидов кальция, натрия и калия. В такой среде на поверхности углеродистой стали самопроизвольно формируется пассивная оксидная плёнка толщиной несколько нанометров, состоящая преимущественно из магнетита (Fe_3O_4) и γ -оксида железа ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Эта плёнка характеризуется высокой электрохимической стабильностью и резко снижает скорость анодного растворения металла – на 4–6 порядков по сравнению с активным состоянием 33.

Разрушение пассивного состояния (депассивация) происходит под действием двух основных групп факторов: химических (нейтрализация щёлочности) и физико-химических (проникновение агрессивных ионов).

1.1. Карбонизация как фактор равномерной коррозии

Карбонизация представляет собой процесс диффузии атмосферного углекислого газа (CO_2) в толщу бетона с последующей химической реакцией:

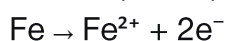


В результате этой реакции щелочной резерв бетона истощается, и pH поровой жидкости снижается до значений 8–9. При таком pH пассивная плёнка становится термодинамически нестабильной, и на всей открытой поверхности арматуры начинается равномерная электрохимическая коррозия с образованием рыхлых продуктов (гидроксидов и оксигидратов железа). Скорость карбонизации зависит от пористости бетона, его влажности, температуры и концентрации CO_2 в атмосфере. В городских условиях с повышенным содержанием этого газа процесс ускоряется. Равномерная коррозия хотя и не приводит к столь быстрым локальным разрушениям, как питтинг, но постепенно уменьшает рабочее сечение стержней, снижая несущую способность конструкции 44.

1.2. Хлоридная агрессия и питтинговая коррозия

Значительно более опасным механизмом является хлорид-индуцированная коррозия. Хлорид-ионы (Cl^-) поступают в бетон из противогололёдных реагентов, морской воды, грунтовых рассолов или добавляются в бетонную смесь с загрязнёнными заполнителями. В отличие от карбонизации, хлориды не снижают глобальный pH бетона, но способны локально разрушать пассивную плёнку в местах адсорбции, проникая через её дефекты.

Механизм носит автокаталитический характер. На небольшом участке поверхности (аноде) начинается активное растворение железа:



Внутри образующейся язвы (питтинга) из-за гидролиза ионов Fe^{2+} происходит подкисление раствора до pH 3–4, что дополнительно ускоряет растворение металла. Хлорид-ионы, не расходуясь в реакции, циркулируют между анодом и катодными участками, где протекает восстановление кислорода. Скорость роста питтингов может достигать нескольких миллиметров в год, при этом внешние признаки (ржавые пятна, трещины) появляются лишь на поздних стадиях, когда потеря сечения уже значительна.

На рис. 1 представлен типичный пример оголённой арматуры после скалывания защитного слоя бетона – видны множественные питтинговые язвы с продуктами коррозии бурого цвета. Характерно, что металл между язвами может сохранять пассивное состояние, что создаёт высокую локальность электрических полей и ускоряет гальваническую коррозию.

1.3. Роль трещин в транспорте агрессивных агентов

Трещины в бетоне являются основными каналами миграции CO_2 , хлоридов и влаги к поверхности арматуры. Принципиально различают два вида трещин:

– *Поперечные (растяжные) трещины* – возникают в растянутой зоне изгибаемых элементов при рабочих нагрузках. Их ширина раскрытия нормируется строительными стандартами (обычно до 0,3–0,4 мм), но даже такие узкие трещины многократно ускоряют диффузию агрессивных ионов по сравнению с неповреждённым бетоном.

– *Продольные трещины* – являются прямым следствием коррозии. Продукты ржавчины имеют удельный объём в 2–9 раз больший, чем исходный металл. Это создаёт внутреннее распирающее давление, которое приводит к растрескиванию защитного слоя бетона по линии стержня. После этого коррозия выходит на поверхность и ускоряется лавинообразно [55].

Таким образом, трещины выступают не только как пути доступа, но и как индикаторы активно протекающего процесса, что важно при разработке стратегий мониторинга.

2. Стадии коррозионного процесса и факторы ускорения

Коррозия арматуры в бетоне традиционно делится на два временных этапа:

1. **Стадия инициирования** – период от момента заливки бетона до начала разрушения пассивной плёнки. Её продолжительность определяется временем накопления критической концентрации хлоридов на поверхности стали (порог – около 0,2–0,4% от массы цемента) либо глубиной карбонизации, достигающей арматуры. Этот этап может длиться десятки лет, но в агрессивных средах сокращается до 2–5 лет.

2. **Стадия распространения** – период активного коррозионного разрушения, начинающийся после депассивации. Скорость коррозии на этом этапе контролируется доступом кислорода, влажности и удельным электросопротивлением бетона.

Ключевыми факторами, ускоряющими процесс, помимо хлоридов и

карбонизации, являются:

- Повышенная влажность (60–80% относительной влажности воздуха) – обеспечивает электролитическую проводимость поровой жидкости;
- Переменные температурные циклы (замерзание-оттаивание) – разрушают структуру бетона и увеличивают проницаемость;
- Наличие блуждающих токов (вблизи электрифицированного транспорта) – вызывает электрокоррозию;
- Недостаточная толщина защитного слоя – сокращает время доступа агрессоров к металлу.

Понимание этих факторов необходимо для выбора адекватных методов контроля и интерпретации их результатов.

3. Методы мониторинга коррозии: классификация и сравнительный анализ

Современная диагностика состояния арматуры базируется на комплексе подходов, которые могут быть разделены на четыре основные группы: визуально-измерительные, неразрушающие физические, электрохимические и методы локального отбора проб. Каждая группа имеет свои преимущества, ограничения и области применения.

3.1. Визуальный и измерительный контроль

Этот метод является самым доступным и обязательным при любом обследовании. Косвенными признаками коррозии служат ржавые подтёки и пятна на поверхности бетона, отслоения защитного слоя, сетка волосяных трещин, а также местные вздутия и выколы. Для количественной оценки используются:

- Линейки-щелемеры и клинья для измерения ширины раскрытия трещин;
- Механические щупы для определения глубины выбоин;
- Переносные микроскопы типа МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм, позволяющие фиксировать динамику развития трещин во времени [6].

Однако визуальный контроль даёт лишь качественную, запаздывающую информацию и не позволяет оценить скорость коррозии на скрытых участках.

3.2. Неразрушающие физические методы

Эта группа наиболее интенсивно развивается благодаря достижениям приборной техники.

– *Ультразвуковая диагностика* базируется на измерении скорости прохождения продольных и поперечных волн через бетон. Коррозионные повреждения, расслоения и микротрещины уменьшают скорость и увеличивают затухание сигнала. Метод эффективен для поиска крупных дефектов, но малоприменим для оценки состояния одиночного стержня.

– *Георадиолокация* использует импульсное электромагнитное излучение (10 МГц – 2 ГГц) для построения радиолокационных профилей. Позволяет обнаруживать расположение арматуры, оценивать толщину защитного слоя и выявлять зоны повышенной влажности или расслоения, коррелирующие с коррозией. Преимущество – высокая производительность при обследовании больших площадей.

– *Инфракрасная термография* фиксирует аномалии температурного поля на поверхности бетона. Участки с отслоениями (из-за коррозионного растрескивания) имеют иную теплоёмкость и теплопроводность, что проявляется в виде температурных контрастов при солнечном нагреве или искусственном подогреве. Метод чувствителен к поверхностным дефектам, но требует благоприятных погодных условий.

– *Электромагнитная дефектоскопия (вихретоковый метод)* основана на изменении импеданса измерительной катушки при внесении её в поле корродированного металла. Уменьшение сечения стержня и изменение магнитной проницаемости из-за продуктов ржавчины дают измеримый сигнал. Метод применим для стержней с доступом, но сложен для глубокозалегающей арматуры.

3.3. Электрохимические методы мониторинга

Электрохимические подходы признаны наиболее информативными, поскольку они непосредственно отражают скорость электрохимической реакции коррозии и могут давать количественные оценки скорости потери металла в реальном времени.

– *Измерение потенциала свободной коррозии ($E_{кор}$)* относительно стандартного медно-сульфатного электрода сравнения – наиболее распространённый скрининговый метод. Согласно классификации ASTM C876, значения $E_{кор} > -200$ мВ указывают на пассивное состояние, от -200 до -350 мВ – на зону неопределённости, а < -350 мВ – на высокую вероятность активной коррозии. Однако потенциал даёт только вероятностную оценку и не коррелирует напрямую со скоростью.

– *Измерение удельного электрического сопротивления бетона* – косвенный показатель его влажности и степени насыщения солями. Сопротивление ниже 5–10 кОм·см указывает на условия, благоприятные для коррозии, а выше 50–100 кОм·см – на сухое состояние, замедляющее процесс.

– *Метод поляризационного сопротивления (метод линейной поляризации)* – наиболее точный полевой метод оценки мгновенной скорости коррозии. По поляризационной кривой вблизи потенциала свободной коррозии определяют поляризационное сопротивление R_p , которое обратно пропорционально коррозионному току (по уравнению Стерна-Гери). Использование портативных измерителей (например, Galaxy, Gecor, MiniCorr) позволяет получать скорости коррозии в микрометрах в год с погрешностью 15–20%.

– *Электрохимическая импедансная спектроскопия (ЭИС)* – наиболее мощный научно-исследовательский метод, дающий детальную информацию о кинетике электродных процессов, диффузии кислорода, свойствах пассивной плёнки и пористости бетона. В полевых условиях применяется реже из-за сложности аппаратуры и длительности измерений, но перспективен для стационарных систем долгосрочного мониторинга.

3.4. Методы локального опробования

Дополнительно используются отборы бетонных кернов для определения фактической концентрации хлоридов, глубины карбонизации (фенолфталеиновая проба) и pH поровой жидкости. Эти методы разрушающие, но дают калибровочные данные, необходимые для интерпретации неразрушающих измерений.

4. Сравнительная эффективность методов и выбор стратегии

Ни один из методов не является универсальным. Оптимальная стратегия мониторинга предполагает многоуровневый подход:

- На первом этапе (скрининг больших объёмов) применяют визуальный осмотр и георадарное профилирование для выявления зон с подозрениями на коррозию.

- На втором этапе в выявленных проблемных зонах проводят потенциальные карты и измерение электросопротивления бетона для уточнения вероятности активности.

- На третьем этапе в наиболее критических участках выполняют измерения поляризационного сопротивления или используют встроенные датчики для количественной оценки скорости коррозии и её динамики во времени.

Такой иерархический подход позволяет рационально распределить ресурсы и получить максимально достоверную картину состояния объекта.

Особого внимания заслуживают системы непрерывного мониторинга со встроенными электродами, которые уже применяются на новых мостах в Европе и США. Они дают возможность отслеживать изменение коррозионных параметров в реальном времени и прогнозировать остаточный ресурс, что критически важно для принятия решений о ремонте или замене конструкций.

Заключение

Коррозия арматуры в бетоне представляет собой сложный многокомпонентный электрохимический процесс, протекающий, как правило, в две стадии – инициирования и распространения. Наиболее опасной является хлорид-индуцированная питтинговая коррозия, которая развивается скрыто, приводит к локальной потере сечения в несколько раз быстрее равномерной коррозии и способна вызывать внезапное хрупкое разрушение конструкций. Карбонизация, хотя и менее агрессивна по скорости, охватывает большие площади и постепенно снижает общую несущую способность.

Трещины в бетоне, как поперечные (эксплуатационные), так и продольные (коррозионные), многократно ускоряют доступ агрессивных агентов и являются одновременно и причиной, и следствием коррозионных процессов. Поэтому их мониторинг должен быть обязательной частью обследований.

Эффективный контроль состояния железобетонных конструкций возможен только при комплексном применении методов различных групп – визуальных, неразрушающих физических и электрохимических. При этом электрохимические методы (особенно поляризационное сопротивление и импедансная спектроскопия) предоставляют самую ценную количественную информацию о мгновенной скорости коррозии и позволяют прогнозировать остаточный ресурс. Для массовых обследований целесообразно использовать иерархические схемы с последовательным сужением зон поиска. В перспективе развитие стационарных систем мониторинга и гибридных приборов, совмещающих несколько электрохимических методов, позволит перейти к полностью автоматизированному контролю состояния арматуры, что значительно повысит безопасность и снизит эксплуатационные затраты на инфраструктурных объектах.

References

1. Артемов М. Росавтодор: около 4 тысяч мостов в стране находятся в аварийном состоянии. Парламентская газета, 2023.
2. Bridge Conditions Across America. E&H Bridges, 2025.
3. Артамонов В.С. Защита железобетона от коррозии. М.: Стройиздат, 1967. – 280 с.
4. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.
5. Mangat P., Elgarf M. Corrosion of steel in concrete: cracking and spalling. ACI Structural Journal, 1999, Vol. 96, No. 1, p. 149–158.
6. ГОСТ Р 58945-2020. Правила выполнения измерений параметров зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2020. – 24 с.
7. Рекомендации по оценке коррозионного состояния арматуры в бетоне (НИИЖБ). М., 2005.
8. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. Materials and Structures, 2004, Vol. 37, p. 623–643.

UDC 66.023

Poluboyarinov D.A. Mesoporous Carbon: Problems and Prospects of Equipment Design for Production

Мезопористый углерод: проблемы и перспективы аппаратного оформления процесса получения

Poluboyarinov Dmitry Alekseevich,

Postgraduate Student, Tambov State Technical University, Tambov

Полубояринов Дмитрий Алексеевич,

аспирант, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов

Abstract. This review presents a patent and technical analysis of specialized sources from 1995–2024 in the field of reactor equipment for the liquid-phase synthesis of mesoporous carbon structures via the oxidation of anthracite with concentrated hydrogen peroxide. The study substantiates the need for a transition from traditional discrete process schemes to multifunctional combined units of the "Reactor-Filter-Dryer" (RFD) type. A critical engineering assessment was conducted on the applicability of existing patents for carbon activation in liquid-phase media, and a detailed analysis was performed on the hazardous risks of decompression systems arising under conditions of intense autocatalytic decomposition of the oxidant. Based on the analysis, the design of modular RFD systems has been recognized as the most promising direction for further development. At the same time, an acute shortage of reliable calculation methods describing the conjugate unsteady heat and mass transfer in such apparatuses has been identified as the key constraint hindering their widespread implementation in industrial practice.

Keywords: mesoporous carbon, liquid-phase oxidation, chemical reactor, combined processes, reactor-filter-dryer, modular apparatus, patent review.

Аннотация. Настоящий обзор посвящен патентно-техническому анализу профильных источников за 1995–2024 годы в области реакторного оборудования для жидкофазного синтеза мезопористых углеродных структур путем окисления антрацита концентрированным пероксидом водорода. В ходе исследования обоснована необходимость перехода от традиционных дискретных технологических схем к многофункциональным совмещенным агрегатам типа «Реактор-Фильтр-Сушилка» (РФС). С инженерной точки зрения проведена критическая оценка применимости существующих патентов по активации углерода для жидкофазных сред, а также проанализированы возможные риски систем декомпрессии, возникающие в условиях интенсивного автокаталитического распада оксиданта. На основе проведенного анализа сделан вывод, что наиболее перспективным направлением дальнейшего развития является конструирование модульных РФС-систем, но ключевым сдерживающим фактором для их широкого внедрения в промышленную практику является дефицит надежных расчетных методик, описывающих сопряженный нестационарный теплообмен в таких аппаратах.

Ключевые слова: мезопористый углерод, жидкофазное окисление, химический реактор, совмещенные процессы, реактор-фильтр-сушилка, модульный аппарат, патентный обзор.

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

ВВЕДЕНИЕ

Развитие энергетики, сорбционных технологий и гетерогенного катализа формирует спрос на углеродные матрицы с настраиваемой пористостью. Жидкофазная термохимическая деструкция антрацита концентрированным пероксидом водорода

позволяет получать мезопористые каркасы за счет селективного выгорания неупорядоченных фрагментов угля без применения дорогостоящих темплатов.

Масштабирование процесса сдерживается технологическими барьерами [1, 9, 10]. Реакция протекает с высокой экзотермичностью: автокаталитический распад H_2O_2 на поверхности угля способен вызвать термический разгон, сопровождающийся выделением молекулярного кислорода и вскипанием массы. Проектирование оборудования затруднено уносом до 50% растворителя в виде пара, быстрой седиментацией тяжелого антрацита и высокой коррозионной агрессивностью среды (кислотные смеси при температуре до 110 °C).

В современной практике операции распределены по изолированным аппаратам [11]. С позиций системного анализа, такая дискретная схема ухудшает технико-экономические показатели, увеличивает энергозатраты и приводит к потерям высокодисперсного продукта (8–15%). Настоящий обзор (1995–2024 гг.) посвящен систематизации конструктивных решений для перехода к многофункциональным совмещенным агрегатам [2–5, 11].

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС И КРИТИКА ДИСКРЕТНЫХ СХЕМ

Физико-химическая специфика окисления антрацита задает жесткие ограничения на параметры оборудования. Диспергирование угля при гидромодуле 1:4 требует интенсивного перемешивания; при низких частотах сдвига (<50 об/мин) возникают придонные застойные зоны, блокирующие теплообмен. Введение 50%-го H_2O_2 вызывает глубокую деструкцию: на каждые 75 г сырья унос массы за счет испарения воды достигает 151 г, а распад оксиданта выделяет до 119 г газов. Кислая среда (H_2SO_4 , HNO_3) при температурах до 110 °C требует применения титановых сплавов или футеровки.

Раздельное размещение емкостного реактора, нутч-фильтра и сушильного шкафа обладает критическими недостатками. Транспортировка горячей суспензии с остаточным H_2O_2 сопряжена с риском декомпрессионного закипания в трубах [11, 12]. Адгезия влажного угля к внутренним поверхностям снижает выход продукта на 8–15%. Ручной съем кислых кеков и сушка при 110 °C нарушают требования экологической безопасности и увеличивают длительность производственного цикла, поэтому одним из выходов из данной ситуации могут стать модульные конструкции, объединяющие несколько процессов в рамках одного аппарата.

2. ПАТЕНТНЫЙ АНАЛИЗ РЕАКТОРНЫХ СИСТЕМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

2.1. Конструкции реакторов периодического действия

Отечественное химическое машиностроение ориентировано на аппараты для сухой термической активации углерода, прямое заимствование которых для жидкофазных сред невозможно. В патенте РФ № 2768123 [2] предложен вертикальный реактор со статической секционной сборкой для парогазовой активации при температурах до 900 °С. При жидкофазном окислении отсутствие принудительного перемешивания приведет к осаждению тяжелого угля на дно, локальному термодинамическому закипанию массы и термическому разгону оксиданта. В патенте РФ № 2780200 [3] описан реактор барабанного типа с внутренним винтовым контуром для сухих сред. Использование вращающегося корпуса для агрессивных суспензий при 110 °С конструктивно неоправданно: оно исключает организацию секционного охлаждения для съема экзотермического тепла, а перекачивание плотной суспензии по лопастям вызовет кавитацию и взрывное вскипание.

2.2. Ограничения систем утилизации и газоочистки

Пиковые залповые выбросы вторичного пара и кислорода требуют высокой пропускной способности узлов декомпрессии. В патенте РФ № 2794893 [4] описан реактор-нейтрализатор со встроенным барботером для улавливания газов при щелочной активации. При жидкофазном окислении фиксированный объем барботажного узла не справится с залповым выбросом пара (151 г на мелкую партию), что может вызвать опасный скачок давления. В патенте РФ № 2826290 [5] аппарат снабжен камерой конденсации и узлом аварийного сброса паров металлического калия. Применение схемы в жидкофазном процессе ограничено тем, что высокоскоростной поток уносит микрочастицы углерода. Внутренние каналы и пружины клапанов подвержены быстрой кольматации угольным шламом, что может заблокировать защитные функции узла.

3. МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СОВМЕЩЕННЫЕ АГРЕГАТЫ

Устранение недостатков дискретных схем реализуется интеграцией процессов в аппаратах типа «Реактор-Фильтр-Сушилка» (РФС) (патенты РФ № 2104771 [6] и № 2096078 [7]). В вертикальном корпусе, разделенном горизонтальной фильтровальной перегородкой, размещено реверсивное перемешивающее устройство с осевым перемещением. Лопасты последовательно осуществляют перемешивание суспензии, разглаживание осадка при вакуумном фильтровании и рыхление материала при сушке через обогреваемую рубашку. Однако при обработке полифракционного антрацита жесткая горизонтальная перегородка мгновенно забивается (кольматируется)

микрочастицами угля, блокируя фильтрацию. Для преодоления моноблочных ограничений в патенте РФ № 2746401 [8] предложен модульный царговый аппарат. Нижний фильтрующий модуль выполнен в виде съемного кассетного блока, что позволяет оперативно менять перегородки. Однако наличие множества фланцев повышает риск разгерметизации при залповом вскипании H_2O_2 . Хотя применение титановых сплавов обеспечивает прочность корпуса, необходимость использования фторопластовых уплотнений в стыковочных узлах снижает надежность агрегата. В условиях выраженных вибрационных нагрузок от тяжелой мешалки фторопласт подвержен хладотекучести, что ведет к постепенной разгерметизации фланцев.

4. ДИСКУССИЯ И ВЫЗОВЫ

Переход к РФС-системам снимает риски транспортной разгерметизации, но формирует два критических вызова: мгновенную закупорку пор высокодисперсным углем и аппаратурный дефицит поверхностей охлаждения для демпфирования экзотермического распада H_2O_2 . Главным научно-техническим ограничением является полное отсутствие верифицированных инженерных методик расчета сопряженного нестационарного теплообмена, протекающего одновременно с фазовыми переходами в замкнутом объеме. Существующие математические модели [11, 12] оперируют стационарными режимами или ньютоновскими средами низкой плотности. Для высококонцентрированных суспензий антрацита в смесях $H_2SO_4-HNO_3-H_2O_2$ они неприменимы. Необходимы расчетные уравнения, связывающие геометрию многофункционального перемешивающего органа с кинетикой каталитического распада оксиданта на развитой поверхности углерода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Дискретные технологические схемы исчерпали потенциал модернизации из-за логистических потерь дисперсного продукта (до 15%) и низкой эксплуатационной безопасности при транспортировке кислых реакционных сред.
2. Перспективным вектором развития оборудования является переход к модульным совмещенным агрегатам РФС, реализующим синтез, фильтрацию, промывку и сушку в едином герметичном пространстве.
3. Анализ патентного фонда (1995–2024 гг.) показал, что существующие отечественные аппараты сухой активации не могут быть напрямую адаптированы под жидкофазные процессы из-за дефицита регулируемого теплосъема и высокого риска кольматации систем декомпрессии угольным шламом.

4. Главным барьером на пути промышленного внедрения РФС-технологий остается отсутствие методик расчета сопряженного нестационарного тепломассообмена, учитывающих кинетику автокатализа и интенсивный фазовый переход растворителя, что определяет приоритет дальнейших исследований.

References

1. Патент № 2620404 Российская Федерация, МПК C01B 32/30. Способ получения мезопористого углерода / А. Г. Ткачев, А. В. Мележик, Г. В. Соломахо ; заявитель и патентообладатель ООО «НаноТехЦентр». — № 2016102315 ;заявл. 26.01.2016 ;опубл. 25.05.2017, Бюл. № 15.
2. Патент № 2768123 Российская Федерация, МПК C01B 32/30, B01J 19/18. Реактор для активации углеродного материала / А. Г. Ткачев, А. В. Мележик, И. Н. Шубин, А. А. Попова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». — № 2021109968 ;заявл. 09.04.2021 ;опубл. 23.03.2022, Бюл. № 9.
3. Патент № 2780200 Российская Федерация, МПК B01J 19/18, B01F 27/00. Реактор для синтеза активированного углеродного материала / И. Н. Шубин, А. А. Попова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». — № 2022108740 ;заявл. 01.04.2022 ;опубл. 21.09.2022, Бюл. № 26.
4. Патент № 2794893 Российская Федерация, МПК B01J 19/00, C01B 32/30. Реактор-нейтрализатор для активации углеродного материала / А. Г. Ткачев, И. Н. Шубин, А. А. Попова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». — № 2022127131 ;заявл. 19.10.2022 ;опубл. 25.04.2023, Бюл. № 12.
5. Патент № 2826290 Российская Федерация, МПК C01B 32/34, B01J 19/00. Реактор химической активации углеродного материала / И. Н. Шубин, А. А. Попова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». — № 2023134794 ;заявл. 23.12.2023 ;опубл. 09.09.2024, Бюл. № 25.
6. Патент № 2104771 Российская Федерация, МПК B01D 29/00, B01J 19/18. Реактор-фильтр-сушилка / Г. П. Манюкова, А. М. Гибор, В. В. Андосов ; заявитель и патентообладатель Г. П. Манюкова. — № 96105831/25 ;заявл. 28.03.1996 ;опубл. 20.02.1998.
7. Патент № 2096078 Российская Федерация, МПК B01D 29/00. Реактор-фильтр-сушилка / А. М. Гибор, Г. П. Манюкова, В. В. Андосов ; заявитель и патентообладатель А. М. Гибор. — № 95109872/25; заявл. 13.06.1995; опубл. 20.11.1997.

8. Патент № 2746401 Российская Федерация, МПК В01Д 29/44, В01Ж 19/18. Модульный аппарат для проведения совмещенных процессов «реакция-фильтрация-сушка» / И. В. Попов, С. В. Киселев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». — № 2020125489 ;заявл. 22.07.2020 ;опубл. 13.04.2021, Бюл. № 11.

9. Патент № 2761216 Российская Федерация, МПК С01В 32/00. Мезопористый углерод и способ его изготовления, а также топливный элемент с полимерным электролитом / Н. Хасэгава, Ф. Осада, Х. Кубо, К. Ито ; заявитель и патентообладатель Тойота ДзидосяКабусики Кайся (JP). — № 2021102927 ;заявл. 23.11.2020 ;опубл. 06.12.2021, Бюл. № 34.

10. Патент № 2681005 Российская Федерация, МПК С01В 32/05. Способ получения мезопористого углерода / Г. С. Захарова, Е. И. Андрейков, И. С. Пузырев, Н. В. Подвальная ; заявители и патентообладатели Институт химии твердого тела УрО РАН, Институт органического синтеза им. И. Я. ПостовскогоУрО РАН. — № 2017142073 ;заявл. 04.12.2017 ;опубл. 01.03.2019, Бюл. № 7.

11. Попова, А. А. Совершенствование аппаратурно-технологического оформления производства высокопористого углеродного материала / А. А. Попова, И. Н. Шубин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2023. — № 6 (759). — С. 87–96.

12. Шубин, И. Н. Анализ влияния режимных параметров процесса высокотемпературной химической активации на конструкционный материал оборудования / И. Н. Шубин, А. А. Попова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2022. — № 8. — С. 24–32.

INDUSTRIAL RESEARCH AND PRODUCTION

UDC 621.923

Kostyuk I.A., Krasnova M.N. Physical model of abrasive grain interaction with the workpiece surface under conditions of high temperatures, pressures, and chemical affinity of materials

Физическая модель взаимодействия абразивного зерна с поверхностью заготовки в условиях высоких температур, давлений и химического сродства материалов

Kostyuk Ivan Aleksandrovich,

master

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

Krasnova Marina Nikolaevna

PhD in Engineering, Associate Professor,

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

Костюк Иван Александрович,
магистр

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

Краснова Марина Николаевна

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

Abstract. The paper describes a physical model of the interaction between an abrasive grain and the workpiece surface under conditions of high temperatures, pressures, and chemical affinity of materials.

Keywords: abrasive grain, high temperatures, pressure, application software, chemical affinity of materials, physical model.

Аннотация. В работе описана физическая модель взаимодействия абразивного зерна с поверхностью заготовки в условиях высоких температур, давлений и химического сродства материалов.

Ключевые слова: абразивное зерно, высокие температуры, давление, прикладные программы, сродство материалов, физическая модель.

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

Абразивная обработка является одним из ключевых технологических процессов в современном машиностроении, определяя качество, точность и эксплуатационные свойства поверхностей ответственных деталей. Традиционно процесс съема материала при абразивной обработке рассматривался преимущественно с механистической точки зрения, как совокупность актов микрорезания и пластического деформирования единичным зерном. Однако при переходе к высокопроизводительным режимам,

обработке новых конструкционных материалов (таких как жаропрочные никелевые сплавы, титановые композиты, керамика) и использовании сверхтвердых абразивов классическая модель перестает быть адекватной.

В зоне контакта абразивного зерна с поверхностью заготовки возникает экстремальное сочетание физических факторов: контактные давления достигают предела текучести и прочности обрабатываемого материала, а интенсивная деформация и трение генерируют высокие локальные температуры. В этих условиях поверхностный слой заготовки переходит в квазижидкое или высокопластичное состояние, что кардинально меняет механизм взаимодействия. Процесс перестает быть чисто механическим и приобретает выраженный термомеханический характер.

Дополнительную сложность вносит химический аспект взаимодействия. При высоких температурах и наличии химически активных элементов в зоне резания (например, кислорода из окружающей среды или элементов, входящих в состав смазочно-охлаждающей жидкости) на свежееобразованных ювенильных поверхностях активизируются химические реакции. Химическое сродство материалов абразива и заготовки приводит к образованию новых фаз – твердых растворов, карбидов, оксидов или интерметаллидов. Эти новообразования могут как облегчать процесс обработки, будучи более хрупкими, так и затруднять его, образуя налипания на зерне (засаливание) или упрочненные «белые слои» на поверхности детали.

Физическая модель описывает взаимодействие абразивного зерна с поверхностью заготовки в условиях высоких температур, давлений и химического сродства материалов.

Ключевые физические процессы:

1. Механика микрорезания. Снятие материала происходит не сплошным слоем, а отдельными микроцарапинами от вершин абразивных зерен. Для труднообрабатываемых материалов характерно преобладание упругой деформации над пластической до момента хрупкого разрушения или образования стружки.

2. Трение и износ инструмента. Высокое химическое сродство приводит к интенсивному адгезионному износу (схватыванию), диффузии и абразивному истиранию связки круга.

3. Теплофизика. Основная часть энергии резания переходит в тепло. В зоне контакта возникают экстремальные температуры, вызывающие структурные изменения в поверхностном слое детали («белый слой», прижоги) и термическое разупрочнение или разрушение абразива.

4. Динамика системы. Процесс сопровождается вибрациями (автоколебаниями), которые влияют на шероховатость поверхности и стабильность съема металла.

Для описания этих процессов используется система дифференциальных уравнений в частных производных (уравнения теплопроводности, Навье-Стокса для пограничного слоя СОЖ) и алгебраические соотношения:

Закон сохранения энергии (уравнение теплопроводности):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 * (\kappa \nabla T) + Q_{gen},$$

где: T – температура; ρ – плотность материала; c_p – удельная теплоемкость; κ – коэффициент теплопроводности; Q_{gen} – объемная плотность тепловыделения от трения и деформации.

Силовая модель (расчет сил резания). Суммарная сила резания F_s раскладывается на тангенциальную (F_t) и нормальную (F_n) составляющие. Для каждого зерна рассчитывается локальная сила по эмпирическим зависимостям, зависящим от глубины внедрения зерна, скорости резания и свойств материала.

$$F_t = K_t * a_e^{n1} * V_\omega^{n2} * A_g,$$

где: F_t – тангенциальная (главная) составляющая силы резания; a_e – глубина резания (или глубина внедрения зерна); V_ω – скорость заготовки; A_g – площадь контакта зерна с материалом; K_t , $n1$, $n2$ – эмпирические коэффициенты, определяемые экспериментально для конкретных условий обработки.

Модель износа инструмента. Интенсивность износа описывается как функция контактной температуры, давления и времени работы.

$$\frac{dW}{dt} = f(T, p, v),$$

где: dW/dt – скорость износа (изменение величины износа W по времени t); T – контактная температура; p – контактное давление; v – скорость резания.

Геометрическая модель описывает топографию рабочей поверхности круга (распределение зерен по размерам, их выступание над связкой) и формирование рельефа обработанной поверхности.

Реализация такой модели требует использования специализированного пакета прикладных программ (далее – ППП), который объединяет инструменты численного моделирования, анализа данных и визуализации. Такой пакет должен быть модульным.

Основу составляет среда для решения систем нелинейных дифференциальных уравнений методом конечных элементов (МКЭ). Наиболее подходящими инструментами являются открытые библиотеки (например, deal.II, FEniCS) или коммерческие CAE-системы (ANSYS Mechanical APDL, Abaqus). Дискретизация геометрии зоны резания, генерация конечно-элементной сетки, решение уравнений теплопроводности и механики деформируемого твердого тела.

Модуль препроцессорной подготовки – интерфейс для задания исходных данных. Ввод параметров: пользователь вводит свойства обрабатываемого материала

(модуль Юнга, предел текучести, теплопроводность), характеристики абразивного инструмента (зернистость, твердость, материал зерна), режимы обработки (скорости, подачи). Генерация геометрии: создание упрощенной 2D/3D-модели взаимодействия одного или нескольких абразивных зерен с заготовкой.

Модуль решателя (Solver) – сердце программы, выполняющее вычисления. Каскадное решение – последовательный расчет. Сначала решается стационарная задача теплопроводности для определения поля температур. Затем полученное поле температур используется как входное условие для решения задачи термоупругопластичности для расчета напряжений, деформаций и сил резания.

Параллельные вычисления: использование многопоточности (CPU) или графических ускорителей (GPU) для ускорения расчетов сложных 3D-моделей.

Модуль постпроцессорной обработки и визуализации – анализ и представление результатов. Включает визуализацию полей, графики и диаграммы, экспорт данных (сохранение результатов в стандартных форматах (CSV, VTK) для дальнейшего анализа).

Для гибкости и возможности автоматизации расчетов ядро ППП должно иметь API (интерфейс прикладного программирования) для вызова из языков высокого уровня, таких как Python. Это позволяет использовать мощные библиотеки для научных вычислений (NumPy, SciPy) и машинного обучения (Scikit-learn, TensorFlow) для калибровки модели по экспериментальным данным и оптимизации режимов шлифования.

Таким образом, физическая модель, реализованная в виде такого пакета прикладных программ, становится мощным инструментом инженера-технолога, позволяющим прогнозировать качество поверхности, стойкость инструмента и оптимизировать процесс шлифования без проведения дорогостоящих натурных экспериментов.

References

1. Вереина, Л.И. Абразивная обработка / Л.И. Вереина. – Москва: ИНФРА-М, 2025. – 304 с.
2. Лымарев, И.Г. Моделирование взаимодействия единичного абразивного зерна с поверхностью детали / И.Г. Лымарев // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 12. – С. 86-99.
3. Макаров, В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов / В.Ф. Макарова. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 320 с.
4. Попов, В.Ю. Моделирование в системе Ansys контактирующих поверхностей при шлифовании / В.Ю. Попов // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 1. – С. 30-35.

UDC 621.38

Rabtsevich V.A. Wire sweep investigation in TSSOP package manufacturing using high-temperature transfer molding

Исследование смещения микросварных соединений в процессе изготовления корпусов типа TSSOP методом высокотемпературного литья под давлением

Rabtsevich Vadim Alexandrovich,

design engineer, National Research University of Electronic Technology MIET, Moscow, Zelenograd

Рабцевич Вадим Александрович,

инженер-конструктор НИЛ ТКПМ,

Национальный исследовательский университет МИЭТ, г. Москва, г. Зеленоград

Abstract. *An analysis of the technological process for manufacturing TSSOP packages on a lead frame using high-temperature transfer molding has been carried out. The materials used for the components of these products are considered. Modeling of wire sweep caused by the flow of molten epoxy molding compound has been performed for various microwire materials. The simulation results revealed that the main influence on wire sweep is exerted by the stiffness of the material, and therefore copper is a more preferable option for use in this technology.*

Keywords: EMC, packaging; transfer molding; lead frame, TSSOP.

Аннотация. *Проведен анализ технологического процесса изготовления корпусов типа TSSOP на выводной рамке методом высокотемпературного литья под давлением. Рассмотрены материалы для изготовления компонентов данных изделий. Проведено моделирование смещения микросварных соединений потоком расплава эпоксидного формовочного компаунда для различных видов материалов микропроводов. По результатам моделирования выявлено, что основное влияние на смещение микросварных соединений оказывает жесткость материала, вследствие чего медь является более предпочтительным вариантом для использования в данной технологии.*

Ключевые слова: пресс-материал; корпусирование; литье под давлением; выводная рамка, TSSOP.

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

Введение

Современная микроэлектроника предъявляет жёсткие требования к надёжности, миниатюризации и стоимости корпусирования микросхем. Одним из наиболее распространённых и экономически выгодных методов является литьё под давлением термореактивных эпоксидных компаундов, которое позволяет одновременно корпусировать десятки кристаллов на общей выводной рамке. Корпуса типов TSSOP, SOIC, QFP, выпускаемые по этой технологии, широко применяются в потребительской электронике, автомобильной промышленности и телекоммуникационном оборудовании благодаря низкой себестоимости, высокой производительности и стабильности механических и электрических характеристик.

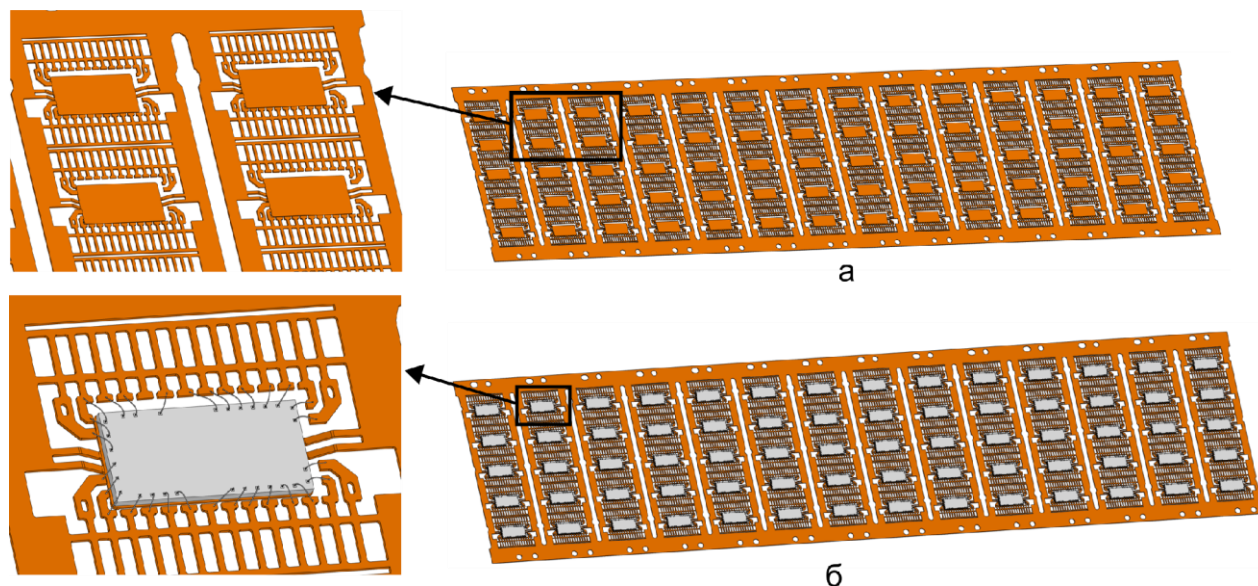
Однако в процессе высокотемпературного литья возникают нежелательные воздействия на микросварные соединения. Поток расплава эпоксидного компаунда, обладающего неньютоновскими свойствами, создаёт вязкую силу сопротивления, которая вызывает смещение проводников. Это явление может приводить к коротким замыканиям соседних проводников, разрыву соединений в зоне шарика или клина, а также к изменению паразитных индуктивностей и ёмкостей, что особенно критично для высокочастотных схем.

Технологический процесс группового изготовления корпусов типа TSSOP на выводной рамке методом высокотемпературного литья под давлением

Изготовление корпусов TSSOP (Thin Shrink Small Outline Package) на выводной рамке осуществляется на линиях, включающих машины приклейки кристаллов, проволоочной разварки, литья под давлением, удаления литников, а также рубки и формовки выводов [1].

Процесс изготовления корпусов типа TSSOP начинается с подготовки компонентов к сборочным операциям. Исходные медные выводные рамки (рисунок 1, а) проходят входной контроль геометрических размеров и чистоты поверхности. Перед установкой кристаллов рамки подвергаются плазменной очистке для удаления органических загрязнений и активации поверхности. Приклейка кристаллов производится автоматическим дозатором, наносящим токопроводящий или непроводящий полимерный клей на площадку рамки. Затем кристалл позиционируется по оптическим меткам, после чего клей отверждается в печи при температуре свыше 100°C. При использовании токопроводящего клея обеспечивается электрический контакт тыльной стороны кристалла с общей шиной заземления, что одновременно улучшает теплоотвод.

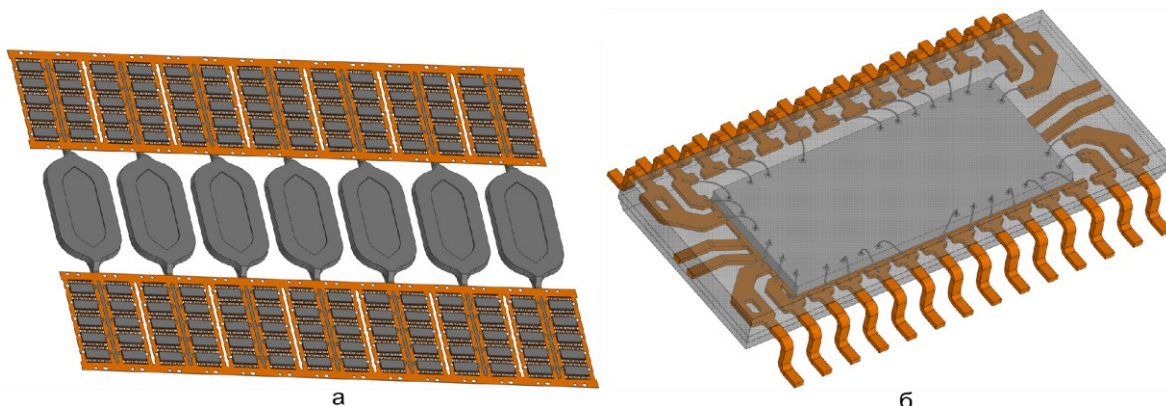
Далее выводная рамка с приклеенными кристаллами проходит операцию формирования микросварных соединений (рисунок 1, б). Стандартно микросварные соединения формируются типом шарик-клин (шарик на кристалле, клин на КП вывода рамки). На медную выводную рамку проводится разварка клином при помощи напыленного на контактную площадку серебра (на стадии изготовления выводной рамки). Шарик разваривается на контактную площадку кристалла, покрытую алюминием [2]. После формирования микросварных соединений мультизаготовка готова к процессу корпусирования методом литья под давлением.



а – выводная рамка корпусов TSSOP до проведения сборочных операций; б – выводная рамка корпусов TSSOP после операций приклейки и формирования микросварных соединений

Рисунок 1 – Модели выводной рамки TSSOP28 на различных стадиях изготовления

За один цикл литья корпусируются две выводные рамки изделий. Они размещаются на разогретой до 175°C нижней пресс-форме в специальные гнезда по две стороны от центральных литников. После размещения выводных рамок, таблетки пресс-материала загружаются в центральные литники при помощи специальной оснастки. Далее пресс-форма смыкается, а плунжера, расположенные в центральных литниках, продавливают терморекативный формовочный компаунд по литниковой системе, в конце которой находится литниковый затвор, позволяющий контролировать подачу материала и получить однородную структуру пластика. После прохождения литникового затвора материал попадает в отливку корпуса. Заполненная материалом отливка выдерживается под давлением и температурой до отверждения органического термореактивного компаунда. После отверждения пресс-форма открывается, а изделие извлекается при помощи выталкивателей. Извлеченные выводные рамки соединяются отвердившемся материалом из литниковой системы (рисунок 2, а). Удаление литников производится на специальной машине с уникальной для каждого типа корпуса пресс-формой. Заключительной операцией изготовления является рубка и формовка выводной рамки. Стандартная машина для данной операции содержит три пресс-формы, одна для рубки выводной рамки и две для формовки выводов. Готовый корпус TSSOP28 показан на рисунке 2, б. Дальнейшие операции с изделием включают упаковку и нанесение покрытия под пайку контактов [3].



а – выводные рамки после корпусирования;
б – готовый корпус после рубки и формовки

Рисунок 2 – Модели корпуса TSSOP28 после проведения операции корпусирования методом литья под давлением

Моделирование смещения микросварных соединений в процессе корпусирования методом высокотемпературного литья под давлением

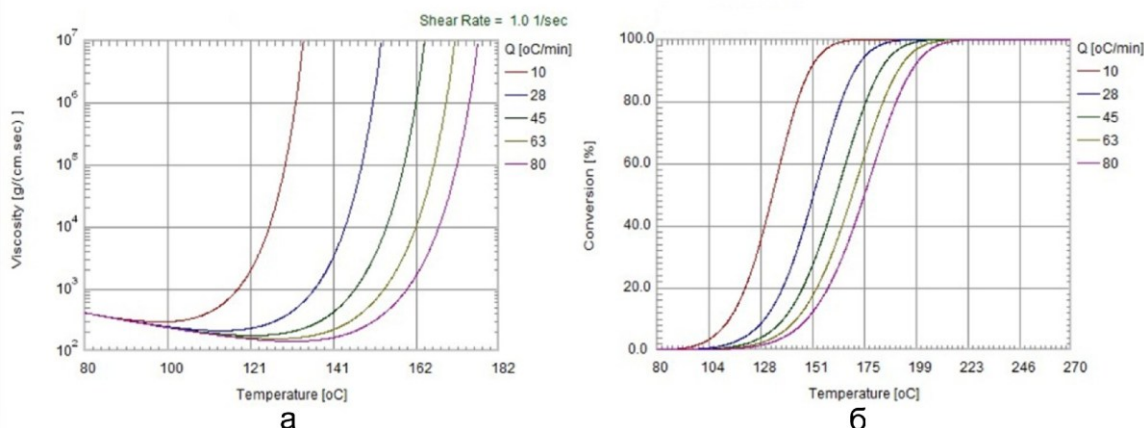
Смещение микросварных соединений (Wire Sweep) – это нежелательное перемещение или изгиб тонких проводов, соединяющих полупроводниковый кристалл с выводами корпуса микросхемы, которое происходит во время процесса корпусирования (заливки) компаундом. Расплавленный компаунд движется внутри полости формы с определенной скоростью и создает вязкую силу сопротивления (вязкое сопротивление - viscous drag force). Проводники, длина которых может достигать нескольких миллиметров при диаметре в 18-27 микрон, под воздействием этого потока могут отклоняться от своего исходного положения. Наиболее критичная зона смещения обычно находится в средней части проволочного вывода. Данная проблема наиболее критична для многовыводных микросхем, поскольку чем меньше расстояние между проводами (и меньше диаметр проволоки), тем выше риск их замыкания во время заливки. Wire Sweep обычно приводит к следующим дефектам микросхем:

- Короткое замыкание. Наблюдается при сильном изгибе проволочных соединений, ведущем к соприкосновению соседних проводников.
- Разрыв соединения. В некоторых случаях воздействие на микросварные соединения настолько велико, что приводит к разрыву проволочного соединения или отрыву от контактной площадки.
- Ухудшение электрических характеристик. Даже без прямого контакта изменение формы и взаимного расположения проводников меняет их взаимную индуктивность и полное сопротивление, что может негативно влиять на стабильность работы устройства, особенно на высоких частотах [4, 5]

Математическое моделирование проводилось методом конечных элементов в САПР Moldex3D. Подготовка трехмерной модели осуществлялась в САПР Компас-3D с дальнейшим экспортом в Rhinoceros для создания конечно-элементной сетки [6]. При генерации сетки среднее количество конечных элементов в виде тетраэдров для расчетной модели составляет 1,2 миллиона при среднем размере стороны элемента 0,05 мм. Микросварные соединения задаются траекторией, диаметр проволоки вводится программно на этапе создания сетки. Места соединения проволоки с рамкой и кристаллом считаются нерушимыми. Температура литья задана равной 175 °С.

Процесс заполнения отливки моделировался на основе стандартных законов гидродинамики и законов отверждения термореактивных полимерных материалов [7, 8, 9]. Эпоксидный формовочный компаунд в расплавленном состоянии является неньютоновской жидкостью, меняющей свою вязкость под действием силы (в зависимости от температуры), вызывая явление сдвигового разжижения.

Пресс-материал для моделирования представлен неньютоновской жидкостью, основным компонентом которого является наполнитель в виде сферического кварца. Основными характеристиками эпоксидного формовочного компаунда для моделирования процесса растекания в пресс-форме являются вязкость материала (абсолютная) и кинетика отверждения. Используемые при моделировании параметры пресс-материала приведены на рисунке 3 [10].



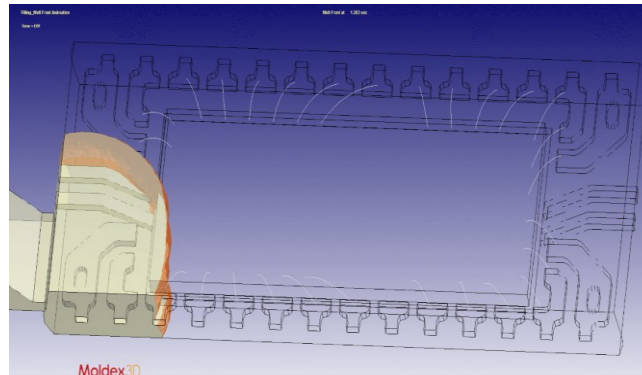
а – функция абсолютной вязкости (viscosity);

б – функция кинетики отверждения (curing kinetics)

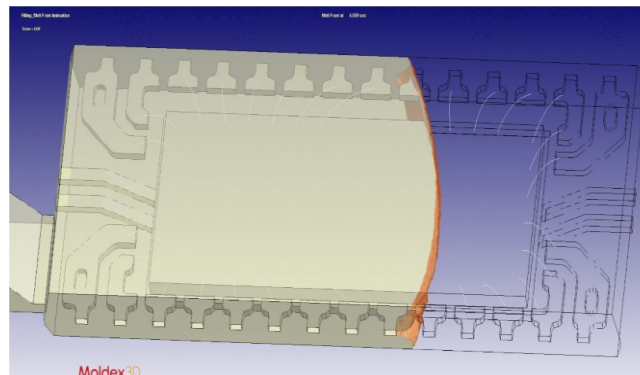
Рисунок 3 – Параметры пресс-материала для моделирования

По результатам моделирования, время заполнения корпуса TSSOP28 эпоксидным компаундом составляет 7 секунд (рисунок 4). Поток расплава продвигается от угла корпуса, где располагается литник, к противоположному концу отливки. В процессе заполнения корпуса термореактивный пресс-материал постепенно отверждается, теряя свою текучесть. Также текучесть на входе в отливку, после

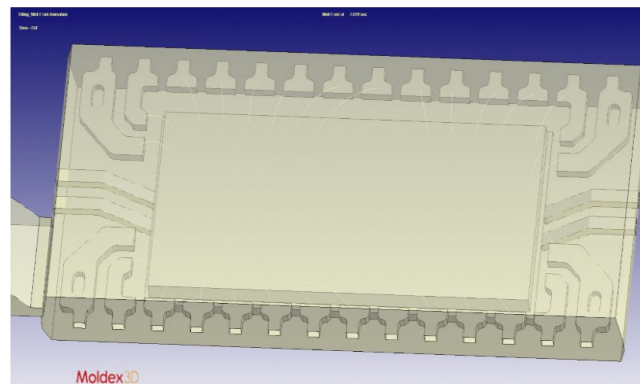
прохождения литникового затвора, выше за счет увеличения скорости сдвига при прохождении сужения русла, что приводит к эффекту сдвигового разжижения. Сказанное выше оказывает значительное влияние на смещение микросварных соединений в зависимости от их расположения. На рисунке 5 показана эпюра смещения микросварных соединений потоком расплава. Микросварные соединения в начале отливки у литника (слева на рисунке) смещаются в несколько раз меньше, чем в конце отливки.



а



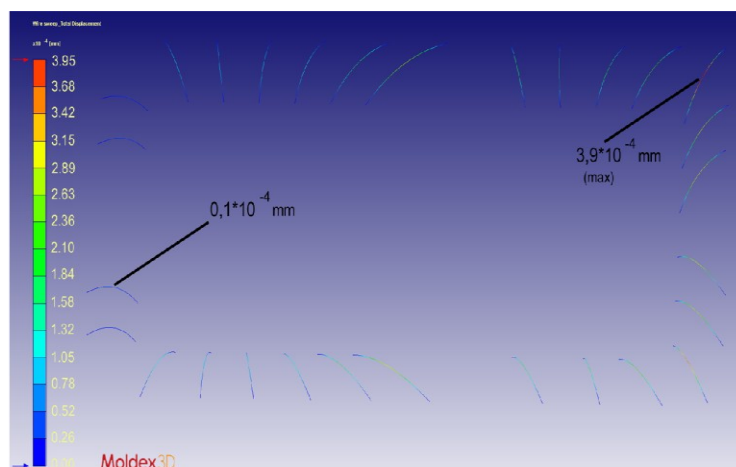
б



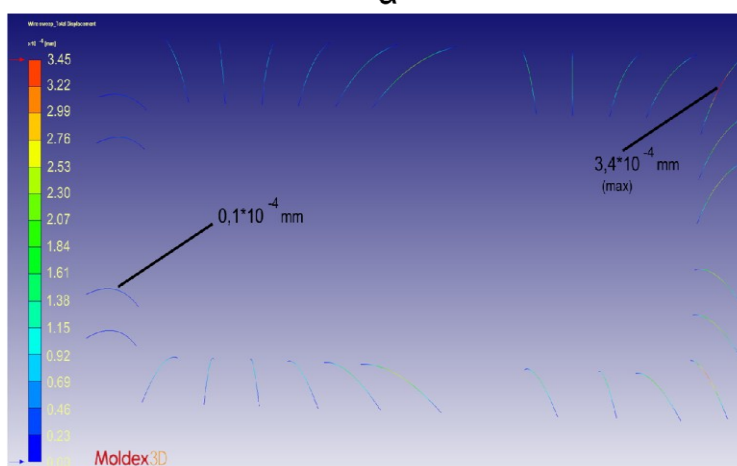
в

а – заполнение на 2-й секунде процесса; б – заполнение на 5-й секунде процесса;
в – полное заполнение на 7-й секунде

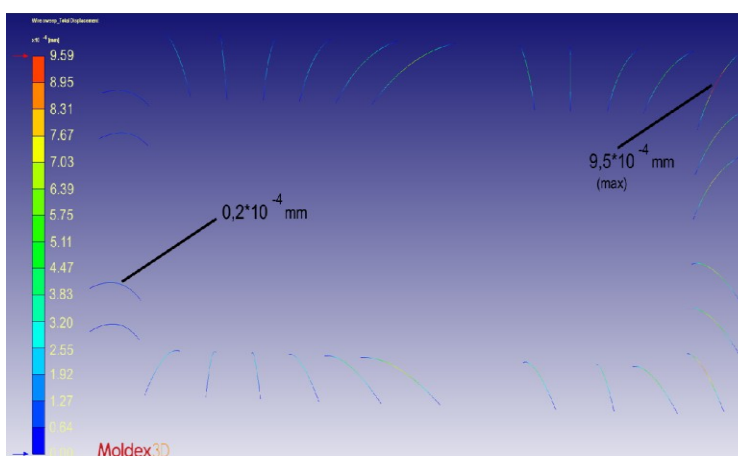
Рисунок 4 – Процесс заполнения корпуса TSSOP28
эпоксидным формовочным компаундом



а



б



в

а – золото; б – медь; в – алюминий

Рисунок 5 – Смещение микросварных соединений различных материалов потоком расплава

Моделирование смещения микросварных соединений проводилось для трех материалов проволоки: золота, меди и алюминия. По результатам моделирования, максимальное смещение для золотой проволоки составляет $3,95 \cdot 10^{-4}$ мм, для медной $3,45 \cdot 10^{-4}$ мм и $9,59 \cdot 10^{-4}$ для алюминиевой. Значения смещения для материалов золота и меди отличаются незначительно, в отличие от алюминия.

Выявлена зависимость между жесткостью материала проволоки микросварного соединения и смещением микросварных соединений потоком расплава. С увеличением жесткости понижается смещение микросварных соединений, что делает медь более предпочтительной для использования в данной технологии. Однако медь обладает значительным недостатком в сравнении с золотом, который заключается в ее высоком окислении, что усложняет технологический процесс изготовления изделий с применением данного материала.

Заключение

Основной из проблем группового корпусирования микросхем методом литья под давлением является смещение, разрыв и пересечение микросварных соединений потоком расплава. По результатам моделирования выявлена зависимость между смещением микросварных соединений и жесткостью материала используемой проволоки, с увеличением которой снижается смещение проводников. Вследствие чего, предпочтительным материалом для использования в микросхемах, корпусируемых методом литья под давлением, является медь. В отличие от золота, она обладает более высокой жесткостью, что положительно влияет на снижение смещения при контакте с текучей средой, однако различие в смещении не столь критично по сравнению с алюминием, для которого смещение в два раза больше. Значительным недостатком меди в сравнении с золотом является высокая степень окисления, что вызывает трудности при сборочных операциях, ведущего к удорожанию оснащения производства.

References

1. Абашин Е. Современные тенденции корпусирования безвыводных металлополимерных корпусов / Абашин Е., Алехин С., Гаврилин А., Данцев О. // Электроника НТБ. – 2024. – № 3. – С. 136-141.
2. Бауман Д.А. Технология сборки (корпусирования) в микроэлектронике: учеб. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2024. – 72 с.

3. Белоус А. И. Корпусирование микроэлектронных приборов. Технологии, конструкции, оборудование / А. И. Белоус, А. А. Паньков. – Москва : Техносфера, 2023. – 558 с
4. Primeaux W. F. Molded plastic package with wire protection: патент 5331205 США. – № 838657; заявл. 21.02.1992; опубл. 19.07.1994. – 7 с.
5. Jong W. R. Wire density in CAE analysis of high pin-count IC packages: Simulation and verification / Jong W. R., Chen Y. R., Kuo T. H. // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2005. – Vol. 32, No. 10. – P. 1350–1359.
6. Пирогов, А.В. Применение систем компьютерного моделирования при производстве изделий из полимерных материалов / А.В. Пирогов. – Санкт-Петербург: Редакционно-издательский отдел университета ИТМО, 2022. – 58 с.
7. Wen-Hsien Yang. Three Dimensional CAE of Wire-Sweep in Microchip Encapsulation / Wen-Hsien Yang, David C. Hsu, Venny Yang, Rong-Yeu Chang, Francis Su, Sheng-Jye Huang // Moldex3d [Сайт]. - режим доступа: <https://www.moldex3d.com/assets/2011/09/Three-Dimensional-CAE-of-Wire-Sweep-in-Microchip-Encapsulation.pdf>
8. Ya-Yuen Chou. A three-dimensional cae molding of microchip encapsulation / Ya-Yuen Chou, Han-Po Yeh, Hsien-Sen Chiu, Chau-Kai Yu, Rong-Yeu Chang // Moldex3d [Сайт]. - режим доступа: <https://www.moldex3d.com/assets/2011/09/A-THREE-DIMENSIONAL-CAE-MOLDING-OF-MICROCHIP-ENCAPSULATION.pdf>
9. Тозелло, Г. Микролитье под давлением / Г. Тозелло, под Редакцией В.Г. Дувидзона. – Санкт-Петербург: Издательство профессия, 2021. – 397 с.
10. Moldex3D Help 2020: Materials. Moldex3D [Сайт]. - режим доступа: https://support.moldex3d.com/2020/en/6-3-4-4_autoprocess.html (дата обращения 20.01.2026)

UDC 658.52:004

Zaykova V.I., Drabenko D.V. Analytical Review of Automated Control Systems for Conveyor-Based Production

Аналитический обзор автоматизированных систем управления конвейерным производством

Zaykova Viktoriya Igorevna

student

GAOU VO LO «GGU»

Scientific supervisor

Drabenko Dmitry Vadimovich

Ph.D., Associate Professor of the Department of Digital Management

GAOU VO LO «GGU»

Зайкова Виктория Игоревна

студентка

ГАОУ ВО ЛО «ГГУ»

Научный руководитель

Драбенко Дмитрий Вадимович

к.т.н., доцент кафедры цифрового менеджмента

ГАОУ ВО ЛО «ГГУ»

Abstract. This analytical review examines the evolution of automated control systems (ACS) for conveyor production in the USSR and Russia throughout the 20th and 21st centuries. The work traces the path from the first mechanized conveyor lines in the 1930s to the introduction of complex computer-based ACS in the 1970s and 1980s. The article analyzes the challenges of the 1990s transition period and the subsequent digital transformation in the 2000s, which involved the integration of ERP/MES systems and robotization. Special attention is given to the current stage, characterized by the transition to Industry 4.0 principles using IoT, artificial intelligence, and digital twins. The article concludes by outlining the prospects for the development of the “digital pipeline” until 2030 in the context of import substitution and government programs for technological development.

Keywords: conveyor production, automated control systems (ACS), history of the USSR industry, digitalization of production, Industry 4.0, robotization, ERP/MES systems, import substitution, industrial Internet of Things (IIoT), artificial intelligence in industry

Аннотация. Данный аналитический обзор рассматривает эволюцию автоматизированных систем управления (АСУ) конвейерным производством в СССР и России на протяжении XX–XXI веков. В работе прослеживается путь от первых механизированных конвейерных линий 1930-х годов до внедрения сложных АСУ ТП на базе ЭВМ в 1970–1980-х годах. Анализируются сложности переходного периода 1990-х годов и последующая цифровая трансформация в 2000-х, связанная с интеграцией ERP/MES-систем и роботизацией. Особое внимание уделено современному этапу, характеризующемуся переходом к принципам Индустрии 4.0 с использованием IoT, искусственного интеллекта и цифровых двойников. В заключении обозначены перспективы развития «цифрового конвейера» до 2030 года в контексте импортозамещения и государственных программ технологического развития.

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

Введение

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]

2. История эволюции конвейерных линий

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]

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:

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 фотозэлементами 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 коопераций 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 технологий. 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 привлёк 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 vision-системами 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]

2. Вступление в XXI век. Внедрение интеллектуальных технологий

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% рунка) 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 (Гольягти) с 2012 года внедрили «Lada MES» на базе «Галактики v.10» интегрированную с IoT-датчиками Bosch Rexroth: 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 edge-вычислениями на ПЛК Schneider Electric и ИИ для оптимизации сборки Mustang (скорость 45 авто/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

Рак с SCADA TraceMode для traceability от фермы до упаковки. К 2020 году 65% конвейеров машиностроения имели цифровые двойники, против 45% в 2008-м. [9]

Заключение. Наши дни

Санкции 2022+ ускорили импортозамещение: рынок PLC вырос на 40%, отечественные аналоги «ОВЕН ПЛК-100», «Форас» и «БиСС» заняли 55%. В Калуге (2025) на российском автозаводе заменили Siemens SCADA/MES на «Диспетчер» и «1С:ERP Управление производством» для конвейера кузовов: система с российскими сервоприводами «Интегра» и vision-камерами «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 edge AI 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 traceability. На «Уралвагонзаводе» (2024) гибкие конвейеры танков с cobots 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 («Айтигрупп»), роботов «Промобот» II 6G-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. Внедрение АСУ в народном хозяйстве СССР в 1960–1970-х годах: замыслы и реализация [Электронный ресурс]. <https://www.computer-museum.ru/articles/materialy-mezhdunarodnoy-konferentsii-sorucum-2014/650/> (дата обращения: 13.01.2026).

2. Журнал «Промышленность» (орган Министерства автомобильной промышленности СССР). №11, 1974. [Электронный ресурс]. URL: https://www.booksite.ru/promych/1974/1974_11.pdf (дата обращения: 15.01.2026).

3. Зарубин Д.А. История автоматизированных систем управления предприятием. Обоснование создания интегрированной системы автоматизации управления предприятием // Международный студенческий научный вестник. 2019. № 6. [Электронный ресурс].; URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19854> (дата обращения: 15.01.2026).

4. История российской автоматизации [Электронный ресурс]. <https://ruli24.ru/history-of-the-russian-automation> (дата обращения: 17.01.2026).

5. Кутейников А.В. История проекта создания автоматизированной системы управления советской экономикой (ОГАС) в 1960–1980-х гг. [Электронный ресурс]. https://www.computer-museum.ru/histussr/ogas_sorucom_2011.htm (дата обращения: 13.01.2026).

6. Парамонов Вячеслав Николаевич Промышленная автоматизация в СССР в 1960-х – середине 1980-х годов: застой или прорыв? [Электронный ресурс]. <https://www.sorucom.org/articles/materialy-mezhdunarodnoy-konferentsii-sorucom-2017/1979/> (дата обращения: 15.01.2026).

7. Парамонова Р.Н. ЭЛЕКТРОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ В СССР В 1965-1975 гг.: ПЛАНЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ [Электронный ресурс]. https://www.iis.nsk.su/files/page/paramonova_r.n.pdf (дата обращения: 13.01.2026).

8. Промышленный ИИ: реальная эффективность, перспективы масштабирования и барьеры внедрения [Электронный ресурс]. <https://asutp.ru/publikacii/2025/07/27/promyshlennyj-ii-realnaya-effektivnost-perspektivy-masshtabirovaniya-i-barery-vnedreniya/> (дата обращения: 17.01.2026).

9. Эволюция конвейеров: 120 лет [Электронный ресурс]. <https://unitmc.ru/news/yevolyuciya-konveyerov-120-let/> (дата обращения: 17.01.2026).

10. Аллен, М. Умные города: технологии, управление, устойчивое развитие / М. Аллен, П. Кларк ; пер. с англ. – М. : Альпина Пабlishер, 2021. – 312 с.

11. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта до 2030 года [Электронный ресурс] // Официальный сайт ai.gov.ru. – URL: <https://ai.gov.ru/ai/documents/national-strategy> (дата обращения: 08.05.2026).

12. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации : указ Президента Рос. Федерации от 10 окт. 2019 г. № 490 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2019. – № 41. – Ст. 5700.

SCIENTIFIC METHODS AND TECHNOLOGIES

UDC 004.92

Mihalkevitch V.A. Dynamic particle interactive visualization algorithms to enhance user engagement

Алгоритмы интерактивной визуализации динамических частиц для повышения вовлеченности пользователя

Mihalkevitch Vladislav Alexeevich

Student, Department of Instrumental and Applied Software Engineering,
MIREA – Russian Technological University,
Russia, Moscow

Scientific supervisor - **Miftakhov Eldar Nailevich**

Professor of Instrumental and
Applied Software Engineering,
MIREA – Russian Technological University,
Russia, Moscow

Михалькевич Владислав Алексеевич
студент, кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения,
МИРЭА – Российский технологический университет,
РФ, г. Москва

Научный руководитель - Мифтахов Эльдар Наилевич
профессор кафедры инструментального и
прикладного программного обеспечения,
МИРЭА – Российский технологический университет,
РФ, г. Москва

Abstract. Object: Development of a mathematical model and software implementation of an interactive visualization algorithms for dynamic particles based on the Canvas API to improve user engagement.

Methods: Vector normalization methods for particle motion control, modular arithmetic for canvas boundary handling, and a frame rate control algorithm for performance optimization were used. The software implementation is written in TypeScript using the Canvas API.

Findings: An object-oriented model of the particle system was developed, and an algorithm for mouse cursor interaction through vector normalization was implemented. Tests confirm stable system operation at 10,000 particles with 45–55 FPS, as well as the effectiveness of frame rate control for reducing the load on the user device.

Conclusions: The proposed algorithmic solutions demonstrate high performance and can be used in the development of interactive web applications requiring dynamic 2D visualization with a large number of independent objects to enhance user engagement.

Keywords: interactive visualization; dynamic particles; Canvas API; vector normalization; modular arithmetic; performance optimization.

Аннотация. Цель: Разработка математической модели и программной реализации алгоритмов интерактивной визуализации динамических частиц на базе Canvas API для повышения вовлеченности пользователя.

Методы: Использованы методы векторной нормализации для управления движением частиц, модульной арифметики для обработки границ холста и алгоритм контроля частоты кадров для оптимизации производительности. Программная реализация выполнена на языке TypeScript с использованием Canvas API.

Результаты: Разработана объектно-ориентированная модель системы частиц, реализован алгоритм взаимодействия с курсором через векторную нормализацию. Проведённые тесты подтверждают стабильную работу системы при 10 000 частиц с частотой 45–55 FPS, а также эффективность контроля частоты кадров для снижения нагрузки на пользовательское устройство.

Выводы: Предложенные алгоритмические решения демонстрируют высокую производительность и могут быть использованы при создании интерактивных веб-приложений, требующих динамической 2D-визуализации с большим количеством независимых объектов для повышения вовлеченности пользователя.

Ключевые слова: интерактивная визуализация; динамические частицы; Canvas API; векторная нормализация; модульная арифметика; оптимизация производительности.

Рецензент: Бюллер Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «Адыгеский государственный университет»

ВВЕДЕНИЕ

Современные веб-технологии активно развиваются, что приводит к повышению требований пользователей не только к функциональности, но также к визуальному оформлению интерфейсов [1]. Интерактивные фоны, анимированные переходы, динамические эффекты, реагирующие на движения курсора, становятся неотъемлемой частью успешных цифровых продуктов.

Внимание молодой аудитории, которая является основным будущим потребителем цифровых продуктов, в условиях информационного перенасыщения легче удерживать динамическими элементами, нежели статичным контентом [2, 3]. Исследования показывают, что среднее время концентрации внимания у представителей новых поколений составляет около 8 секунд, что требует от разработчиков интерфейсов использования эффективных визуальных инструментов для привлечения и удержания внимания [4].

На рынке существуют решения, упрощающие создание подобных эффектов [5-7]. Однако они предлагают ограниченный набор поведений, зачастую не ориентированных на алгоритмическую сложность, не предоставляют облачного хранилища для сохранения и обмена конфигурациями, а также привязаны к конкретным платформам.

Таким образом, возникает противоречие между потребностью рынка в уникальных визуальных решениях и отсутствием инструмента, сочетающего алгоритмическую базу с удобным управлением. Разработка веб-сервиса с открытой библиотекой и модульной архитектурой поведений является актуальной задачей [8].

Актуальность разработки интерактивных систем на основе частиц подтверждается недавними публикациями, в частности работой С. Тенкхоффа и соавторов, представленной на конференции Eurographics 2025, где описывается платформа для симуляции частиц в браузере с возможностью настройки параметров в реальном времени [9].

Настоящая статья посвящена математической модели и программной реализации алгоритмов интерактивной визуализации динамических частиц, которые лягут в основу создаваемой библиотеки.

Материалы и методы

Для визуализации выбран Canvas API как сбалансированное решение, сочетающее производительность при обработке большого числа объектов, гибкость работы с пикселями и кроссбраузерную поддержку, в отличие от более сложного WebGL и менее производительного SVG.

Для реализации выбран TypeScript, обеспечивающий строгую типизацию математических вычислений, и requestAnimationFrame для синхронизации анимации с частотой обновления экрана.

Тестирование производительности проводилось на устройстве с процессором Intel Core i5-12450H и GPU Intel ARC Graphics с использованием встроенного инструмента Chrome DevTools Performance Tab, версии браузера 149.0.7827.104. Измерялись средняя частота кадров FPS и время отрисовки одного кадра при различном количестве частиц N: 1000, 5000, 10000, 15000.

Математическая модель движения частиц

Метод моделирования нечётких объектов с помощью систем частиц был впервые предложен У.Т. Ривзом в 1983 году [10]. Данный подход предполагает представление сложного динамического объекта, например, огня, дыма, взрыва, в виде множества простых элементов – частиц, каждая из которых обладает собственными координатами, скоростью и другими возможными параметрами. Именно этот принцип лёг в основу разработанной модели.

В разработанном решении используется объектно-ориентированная модель, где каждая частица представлена отдельным классом. Вектор состояния частицы описывается параметрами, как показано в формуле 1.

$$S = (x, y, v_y, v_x, w, h, c), \quad (1)$$

где x, y – координаты;

v_y, v_x – компоненты вектора скорости;

w, h – размеры;

c – цвет.

Такой подход позволяет независимо управлять каждой частицей и легко масштабировать систему.

Обновление положения частицы за временной интервал Δt осуществляется по формулам равномерного прямолинейного движения, как представлено в формуле 2.

$$\{x(t + \Delta t) = x(t) + v_x \cdot \Delta t \quad y(t + \Delta t) = y(t) + v_y \cdot \Delta t \quad (2)$$

В программной реализации это выражается следующим кодом, представленном в листинге 1.

Листинг 1. Класс Particle

```
class Particle {  
    constructor(x, y, vx, vy, size, color) {  
        this.x = x;  
        this.y = y;  
        this.vx = vx;  
        this.vy = vy;  
        this.size = size;  
        this.color = color;  
    }  
  
    update() {  
        this.x += this.vx;  
        this.y += this.vy;  
    }  
}
```

Обработка границ – модульная арифметика

Для создания эффекта бесконечного пространства используется принцип модульной арифметики. При выходе частицы за границу холста её координата переносится на противоположную сторону, как представлено в формуле 3.

$$x' = \begin{cases} x + W + \omega, & \text{если } x < -\omega \\ x - W - \omega, & \text{если } x > W \\ x, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (3)$$

где W – ширина холста;

ω – ширина частицы.

Реализация алгоритма, основанного на данной математической модели, представлена в листинге 2.

Листинг 2. Эффект бесконечного пространства

```
checkBounds() {  
    const { width, height } = canvas;  
  
    if (this.x > width) this.x = -this.size;  
    if (this.x < -this.size) this.x = width;  
    if (this.y > height) this.y = -this.size;  
    if (this.y < -this.size) this.y = height;  
}
```

Взаимодействие с курсором – векторная нормализация

При движении курсора для каждой частицы вычисляется направляющий вектор от частицы к курсору, как представлено в формуле 4.

$$\vec{d} = (x_{cursor} - x, y_{cursor} - y) \quad (4)$$

Длина вектора вычисляется по теореме Пифагора, как показано в формуле 5.

$$|\vec{d}| = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (5)$$

Нормализация вектора заключается в делении каждой компоненты на длину, как представлено в формуле 6.

$$\vec{d}_{norm} = \left(\frac{d_x}{|\vec{d}|}, \frac{d_y}{|\vec{d}|} \right) \quad (6)$$

Новый вектор скорости устанавливается пропорционально нормализованному вектору с коэффициентом $k = 3$, как показано в формуле 7.

$$\vec{v}_{new} = k \cdot \vec{d}_{norm} \quad (7)$$

Алгоритм реализуется с оптимизацией для избегания лишнего вычисления квадратного корня при $|\vec{d}| = 0$, как представлено в листинге 3.

Листинг 3. Алгоритм расчёта движения частиц при движении мыши

```
canvas.addEventListener('mousemove', (event) => {  
  const mouseX = event.clientX - canvas.offsetLeft;  
  const mouseY = event.clientY - canvas.offsetTop;  
  
  for (const particle of particles) {  
    const dx = mouseX - particle.x;  
    const dy = mouseY - particle.y;  
  
    // Вычисление квадрата длины для оптимизации  
    const magnitudeSq = dx * dx + dy * dy;  
  
    if (magnitudeSq > 0) {  
      const magnitude = Math.sqrt(magnitudeSq);  
      particle.vx = (dx / magnitude) * 3;  
      particle.vy = (dy / magnitude) * 3;  
    }  
  }  
});
```

На рисунке 1 представлена интерактивная визуализация следования массива частиц за курсором, основанная на описанной математической модели.



Рисунок 1. Интерактивная визуализация

Оптимизация производительности

Для обеспечения стабильной частоты кадров при обработке большого количества частиц $N = 10^4$ используется алгоритм ограничения FPS. Кадр отрисовывается только при превышении заданного временного интервала, как представлено в формуле 8.

$$\Delta t \geq \frac{1000}{FPS_{target}}, \quad (8)$$

где FPS_{target} – целевая частота кадров.

Реализация анимационного цикла с контролем FPS указана в листинге 4.

Листинг 4. Анимационный цикл с контролем FPS

```
let lastTimestamp = 0;
const TARGET_FPS = 100;
const FRAME_INTERVAL = 1000 / TARGET_FPS;

function animate(currentTimestamp) {
  const deltaTime = currentTimestamp – lastTimestamp;

  if (deltaTime >= FRAME_INTERVAL) {
    ctx.clearRect(0, 0, canvas.width, canvas.height);

    for (const particle of particles) {
      particle.update();
      particle.draw(ctx);
    }
    lastTimestamp = currentTimestamp;
  }
  requestAnimationFrame(animate);
}
```

Однако, современные исследования в области оптимизации систем частиц, выполненные Дж. Сэндином, подтверждают, что ключевым узким местом производительности является не вычислительная сложность алгоритмов, а накладные расходы на отрисовку через Canvas API [11].

Результаты тестирования производительности

Проведено тестирование разработанной системы на устройстве с процессором Intel Core i5 и GPU intel ARC Graphics. Результаты тестирования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты тестирования

Количество частиц	Средний FPS	Время отрисовки кадра, мс
1 000	65	~15
5 000	60	~16
10 000	50	~20
15 000	45	~22

В качестве инструмента тестирования используется DevTools браузера Google Chrome версии 149.0.7827.104, как представлено на рисунке 2.

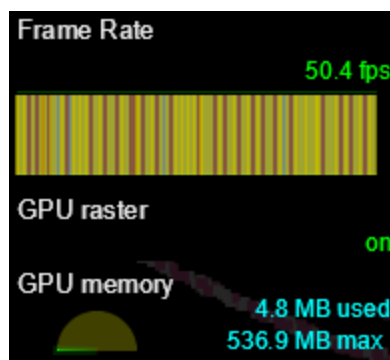


Рисунок 2. Показатели Frame Rate для массива 10 000 частиц
На рисунке 3 показан детальный отчёт тестирования производительности.

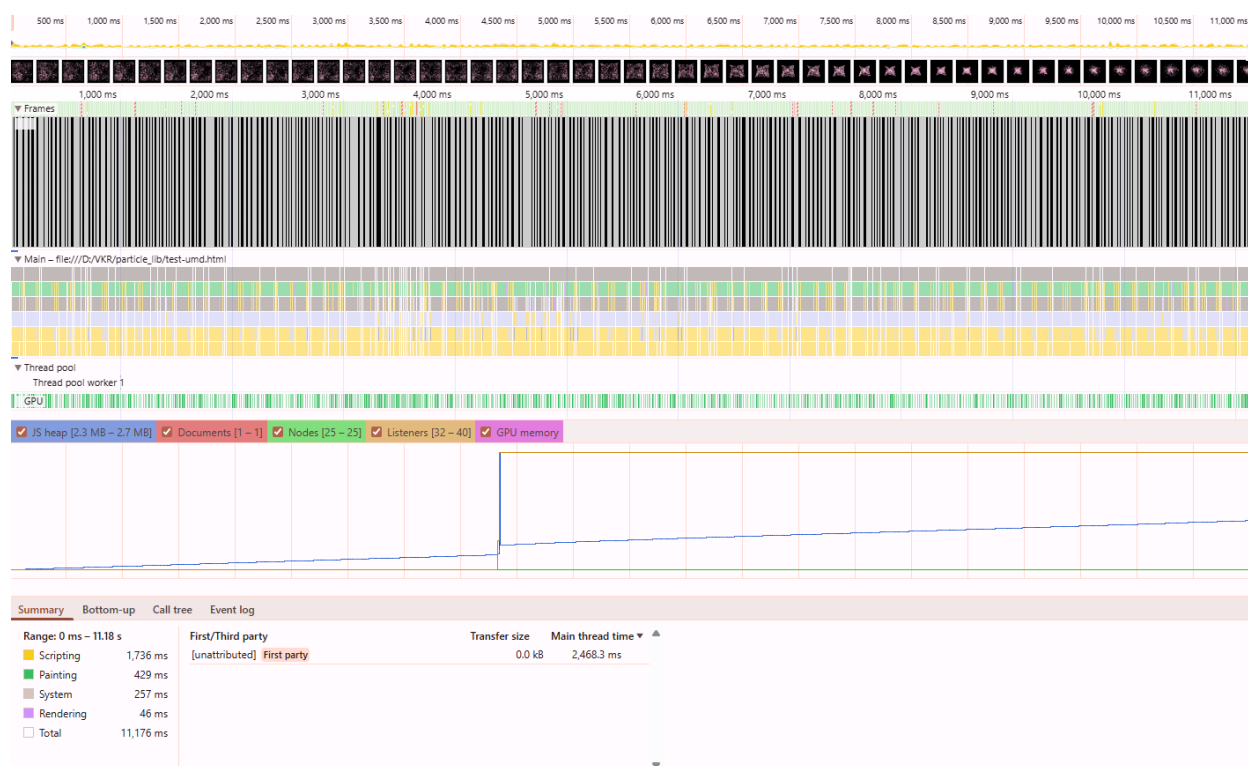


Рисунок 3. Детальный отчёт тестирования массива 10 000 частиц

Полученные результаты показывают, что система сохраняет стабильную производительность при количестве частиц до 10 000 с средним FPS 50. При увеличении числа частиц до 15 000 частота кадров снижается до 45 FPS, однако для большинства практических сценариев использования 10 000 частиц является достаточным.

Обсуждение

На основе разработанной модели могут быть реализованы более сложные алгоритмы поведения частиц:

1) Гравитационное взаимодействие – сила притяжения между частицами по закон всемирного тяготения Исаака Ньютона, формула 9.

$$F = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (9)$$

2) Поведение в электрическом поле – сила, зависящая от расстояния до курсора и «заряда» частицы, как представлено в формуле 10.

$$\vec{F} = \frac{q \cdot \vec{d}}{|\vec{d}|^3} \quad (10)$$

3) Потокное движение – использование шума Перлина для создания естественных траекторий, как показано в формуле 11.

$$\vec{v}(x, y) = \text{Perlin}(x, y, t) \quad (11)$$

В работе В.А. Литовского подробно рассмотрены методы визуализации взрывов с использованием систем частиц, включая гидродинамику сглаженных частиц, что подтверждает перспективность дальнейшего развития библиотеки в направлении физически достоверных эффектов [12].

Заключение

Разработанная математическая модель и её программная реализация на основе Canvas API подтвердили свою эффективность для интерактивной визуализации динамических частиц. Предложенный подход, основанный на векторной нормализации и модульной арифметике, обеспечивает как высокую производительность, так и простоту реализации, необходимую для быстрой интеграции в веб-проекты. Полученные результаты могут быть использованы в качестве вычислительной основы для более сложных алгоритмов, расширяя возможности визуализации в веб-среде для усиления эффекта вовлечения пользователя.

References

1. Sutcliffe A. Designing for User Engagement: Aesthetic and Attractive User Interfaces / A. Sutcliffe. – Cham : Springer Nature, 2022. – 47 p.
2. Prensky M. Digital Natives, Digital Immigrants / M. Prensky // On the Horizon. – 2001. – Vol. 9, No. 5. – P. 1–6.
3. Twenge J.M. iGen: Why Today's Super-Connected Kids Are Growing Up Less Rebellious, More Tolerant, Less Happy – and Completely Unprepared for Adulthood / J.M. Twenge. – New York : Atria Books, 2017. – 352 p.

4. Microsoft Corp. Attention Spans. – URL: <https://sherpapg.com/wp-content/uploads/2017/12/MAS.pdf> (дата обращения: 01.06.2026).
5. Garreau V. Particles.js [Электронный ресурс]. – URL: <https://vincentgarreau.com/particles.js/> (дата обращения: 03.06.2026).
6. Framer [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.framer.com> (дата обращения: 03.06.2026).
7. ReactBits [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.reactbits.dev> (дата обращения: 03.06.2026).
8. Bruni M. Why everyone should stop using particles.js right now [Электронный ресурс]. – URL: <https://dev.to/tsparticles/why-everyone-should-stop-using-particlesjs-right-now-5eb6> (дата обращения: 03.06.2026).
9. Tenckhoff S., Stauss S., Neumann F. Interactive Particle System with Integrated Marching Cubes Algorithm // Eurographics 2025 – Education Papers / ed. by R. Kuffner dos Anjos, K. Rodriguez Echavarria. – London : The Eurographics Association, 2025. – 3 p. – DOI: 10.2312/eged.20251011.
10. Reeves W.T. Particle Systems – A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects / W.T. Reeves // ACM Transactions on Graphics. – 1983. – Vol. 2, No. 2. – P. 91–108.
11. Sandin J. Optimering av partikelsystem för webben : En jämförelse mellan objektorienterad och dataorienterad design på webben : Bachelor's thesis. – Skövde : Högskolan i Skövde, 2023. – 45 p. – URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:his:diva-22798> (дата обращения: 05.06.2026).
12. Литовский В.А. Визуализация взрывов с помощью систем частиц // Молодой учёный. – 2020. – № 25 (315). – С. 108–112.

STANDARDIZATION AND QUALITY

UDC 658.5:005.6:339.138

Matveeva A.I., Antonova E.S., Antonov V.A. Gamification as a tool for increasing consumer engagement in the organization's performance evaluation system for quality management

Геймификация как инструмент повышения вовлеченности потребителей в системе оценки результативности деятельности организации по управлению качеством

Matveeva A.I.

Doctor of Philosophical Sciences, Professor at the Department of Creative Management and Humanities, Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia.

Antonova E.S.

Master's Student at the Department of Creative Management and Humanities, Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia.

Antonov V.A.

Master's Student at the Department of Quality Management and Expertise of Goods and Services, Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia.

Матвеева А.И.

доктор философских наук,

профессор кафедры креативного управления и гуманитарных наук,
Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия.

Антонова Е.С.

магистрант кафедры креативного управления и гуманитарных наук,
Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия.

Антонов В.А.

магистрант кафедры управления качеством и экспертизы товаров и услуг,
Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия.

Abstract. This paper explores the role of gamification in assessing the effectiveness of quality management systems for organizations that interact with consumers through digital channels. The author argues that traditional QMS performance criteria – compliance with requirements, audit results, and achievement of process goals – no longer fully capture the true value of customer processes, as they fail to capture the consumer's behavioral and emotional response to digital services. The goal of this paper is to develop an expanded model for assessing quality management effectiveness, in which gamification marketing metrics serve as an independent analytical framework alongside traditional metrics.

To address this objective, we analyzed the scientific literature on gamification theory and QMS effectiveness assessment, conducted a comparative analysis of existing methods, and reinterpreted published empirical data on the impact of game mechanics on consumer engagement, retention, NPS, and repeat engagement. It is demonstrated that digital engagement metrics complement, rather than replace, traditional quality assessment tools, especially in organizations whose customer value is primarily realized in the digital environment. Based on this, a model for integrating gamification metrics into QMS performance assessment is proposed, with the calculation of an integrated indicator and a meaningful interpretation of the management effect.

Keywords: gamification, customer engagement, quality management, quality management system, performance, digital user experience, retention, NPS, customer satisfaction.

Аннотация. Работа посвящена обоснованию места геймификации в системе оценки результативности управления качеством организации, работающей с потребителем через цифровые каналы. Автор исходит из того,

что классические критерии результативности СМК – соответствие требованиям, результаты аудитов, достижение целей процессов – перестали полностью описывать реальную ценность клиентских процессов, поскольку не фиксируют поведенческую и эмоциональную реакцию потребителя на цифровой сервис. Цель работы – построить расширенную модель оценки результативности управления качеством, в которой маркетинговые метрики геймификации выступают самостоятельным аналитическим контуром наряду с традиционными показателями.

Для решения поставленной задачи применены анализ научной литературы по теории геймификации и оценке результативности СМК, сравнительный анализ существующих методик и вторичная интерпретация опубликованных эмпирических данных о влиянии игровых механик на активность, удержание, NPS и повторное взаимодействие потребителей. Показано, что показатели цифровой вовлеченности не подменяют, а дополняют традиционный инструментарий оценки качества, особенно в организациях, чья ценность для клиента формируется преимущественно в цифровой среде. На этой основе предложена модель интеграции метрик геймификации в оценку результативности СМК с расчетом интегрального показателя и содержательной интерпретацией управленческого эффекта.

Ключевые слова: *геймификация, вовлеченность потребителей, управление качеством, система менеджмента качества, результативность, цифровой пользовательский опыт, retention, NPS, удовлетворенность потребителей.*

Рецензент: Бюллер Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «Адыгеский государственный университет»

Введение

Представление о качестве деятельности организации изменилось вместе с переходом значительной части клиентских процессов в цифровую среду. Потребитель сегодня оценивает не только конечный продукт, но и весь маршрут взаимодействия с брендом: интерфейс, скорость отклика, персонализацию предложения, эмоциональный отклик от сервиса. Это заставляет пересматривать сам предмет оценки результативности системы менеджмента качества: соответствие установленным требованиям остается необходимым, но уже не достаточным условием, если организация не способна удерживать потребительскую ценность на протяжении всего цикла взаимодействия.

Геймификация – использование игровых механик в неигровом бизнес-контексте, которая закрепилась как рабочий инструмент цифрового маркетинга (программы лояльности, мобильные приложения, личные кабинеты, промоактивности интернет-магазинов строятся сегодня с расчетом на повторные действия и вовлеченность аудитории [5]. Показатели, которые формируются в результате применения игровых механик, обладают собственной аналитической ценностью, также они фиксируют не декларируемое, а фактическое поведение клиента, что отличает их от анкетных оценок удовлетворенности.

Проблема, которую решает данная работа, состоит в том, что действующие методики оценки результативности СМК ориентированы главным образом на аудит, выполнение показателей процессов и опросную удовлетворенность, тогда как глубина

поведенческого отклика потребителя в цифровой среде остается за пределами этих методик. Отсюда вытекает необходимость дополнить систему оценки результативности качества метриками цифровой вовлеченности и геймифицированного взаимодействия, не разрушая при этом ее методологическую целостность.

Теоретические основания исследования

Геймификация в академической литературе трактуется как перенос игровых элементов, таких как очки, уровней, достижений, случайных наград в неигровые деловые процессы с целью управляемого изменения поведения аудитории. Практика применения инструмента распадается на три устойчивые формы: самостоятельная маркетинговая стратегия, ядро программы лояльности и механизм ограниченных по времени промокампаний. Из типовых механик наиболее распространены накопительные элементы, достижения, случайные награды, рейтинги, уровни и гибридные сценарии, объединяющие онлайн- и офлайн-контакт с клиентом.

Существенно, что эффект геймификации не декларативен, а поддается количественному измерению: активность пользователей, retention, NPS, трафик, глубина взаимодействия с контентом и частота возвратов образуют устойчивый набор метрик. Тем самым геймификация формирует не только маркетинговый, но и оценочный массив данных, применимый к анализу результативности клиентских процессов, что и делает уместным ее рассмотрение в контексте систем менеджмента качества.

Результативность СМК в устоявшейся трактовке – это степень достижения запланированных целей в области качества и способность системы обеспечивать выполнение этих целей на практике. Методики оценки, представленные в литературе, как правило, строятся на мониторинге и измерении процессов, анализе удовлетворенности потребителей, результатах внутренних и внешних аудитов, реализации корректирующих действий и оценке рисков. В частности, в работе, посвященной оценке результативности СМК испытательной лаборатории, предложена структура, учитывающая выполнение решений предыдущего периода, изменение внешних и внутренних факторов, результативность процессов, удовлетворенность потребителей, итоги аудитов и эффективность работы с рисками. В исследованиях промышленных предприятий дополнительно отмечается роль интегральных показателей и системы сбалансированных показателей при анализе результативности и эффективности СМК. Из этого следует, что включение метрик вовлеченности потребителей в общую модель оценки не разрушает логику стандарта, а развивает ее применительно к условиям цифровой экономики.

Методология и эмпирическая база

Методологический каркас исследования образуют системный и процессный подходы к качеству в сочетании с маркетинговой интерпретацией цифрового клиентского поведения. Эмпирической базой служат опубликованные исследования практик геймификации крупных российских компаний и их влияния на маркетинговые показатели, а также научные работы по методике оценки результативности СМК, раскрывающие состав показателей и способы их агрегирования.

Прикладная часть строится на вторичной статистической интерпретации опубликованных данных и их модельной увязке с задачами оценки качества в которых используется подход, характерный для аналитических работ экономического профиля, где вторичные данные становятся материалом для построения собственной модели оценки.

Анализ практик российских компаний показывает статистически заметное влияние игровых механик на ключевые показатели цифрового взаимодействия: активность, retention, NPS, трафик и глубину вовлеченности в контент. Геймификация в данном контексте работает не только на привлечение новых клиентов, но и на качество их взаимодействия с брендом, которое приводит к укреплению приверженности и росту лояльности клиентов. Отдельного внимания заслуживают гибридные механики, действующие одновременно в онлайн- и офлайн-среде: они расширяют возможности управления клиентским опытом на разных стадиях обслуживания.

Полученные результаты дают основание рассматривать геймификацию как управляемый фактор качества процессов коммуникации, сопровождения и удержания клиента в цифровых каналах: измеряемые показатели активности и лояльности отражают фактическую, а не заявленную ценность сервиса для потребителя.

В рамках маркетингового исследования была сформирована модельная выборка из 300 респондентов, репрезентативно отражающая структуру пользователей изучаемого цифрового сервиса. Доля участников геймифицированных активностей составила 79.5%, что согласуется с эмпирическими наблюдениями о готовности потребителей включаться в игровые сценарии при их понятности и практической ценности (см. Таблицу 1). Показатель такого масштаба указывает на потенциал использования игровых механик как постоянного, а не разового инструмента клиентского взаимодействия. Данные геймифицированного взаимодействия в этом смысле можно считать надежным источником для анализа результативности клиентских процессов: они фиксируют, действительно ли выстроенные сценарии обслуживания стимулируют устойчивую активность, возвращаемость и лояльность аудитории.

Таблица 1.

Базовые статистические показатели геймификации в маркетинговом исследовании

Показатель	Значение	Интерпретация
Объем модельной выборки	300 респондентов	Достаточная база для прикладной интерпретации вторичных данных
Доля участников геймифицированных активностей	79.5%	Высокий уровень принятия игровых механик потребителями
Среднее число взаимодействий до внедрения геймификации	10 в месяц	Базовый уровень активности пользователя
Среднее число взаимодействий после внедрения геймификации	13 в месяц	Рост активности на 30%
Доля пользователей с высоким уровнем активности	40% до / 55% после	Увеличение на 15 п.п.
Участие в акциях и челленджах	25% до / 42% после	Увеличение на 17 п.п.
Повторные покупки	35% до / 45% после	Увеличение на 10 п.п.

Составлено авторами на основании данных [2], [3], [4], [6], [11], представленных в исследованиях геймификации как инструмента повышения вовлеченности, удержания и лояльности потребителей.

Приведенные значения показывают, что геймификация поднимает общую активность пользователей на 30% по числу взаимодействий и заметно усиливает участие в целевых действиях: доля тех, кто откликается на акции и челленджи, выросла на 17 п.п. Растущая доля высокоактивных пользователей и увеличение числа повторных покупок говорят об одном: игровые механики перемещают часть аудитории из категории случайных клиентов в сегмент по-настоящему вовлеченных. Этот эффект нельзя упускать из виду при оценке результативности процессов обслуживания и управления клиентским опытом.

Традиционная модель оценки результативности CMK опирается на удовлетворенность потребителей как на один из внешних индикаторов качества. Но в цифровой среде одной лишь заявленной удовлетворенности мало: здесь важнее устойчивость и глубина пользовательского опыта. Поэтому наряду с оценками удовлетворенности стоит анализировать эмоциональную вовлеченность и NPS (см. таблицу 2). Эти показатели раскрывают не только текущее отношение клиента к сервису, но и его готовность рекомендовать бренд другим, а также то, насколько сильно он к этому бренду привязан.

Таблица 2.

Динамика эмоциональной вовлеченности и лояльности

Показатель	До внедрения геймификации	После внедрения геймификации	Изменение
Индекс эмоциональной вовлеченности	3.2 из 5	4.0 из 5	+0.8
Средний NPS	6.5	7,8	+1,3
Доля промоутеров	20%	32%	+12 п.п.
Доля детракторов	35%	25%	-10 п.п.

Составлено авторами на основании данных [2], [3], [4], [6], [11], представленных в исследованиях геймификации в маркетинге как инструмента повышения вовлеченности и лояльности потребителей,

Рост индекса эмоциональной вовлеченности вместе с повышением среднего NPS показывает, что интерес потребителя к бренду становится глубже, а готовность рекомендовать его знакомым и коллегам растет. Доля промоутеров увеличилась на 12 п.п., доля детракторов сократилась на 10 п.п., и вместе эти цифры говорят о заметном сдвиге в клиентском опыте. В логике оценки результативности управления качеством такой сдвиг можно читать как рост воспринимаемого качества сервиса и как укрепление лояльности аудитории. Насколько результативной окажется геймификация, зависит не только от самого факта ее внедрения, но и от того, какая механика выбрана. Собираательные элементы, механики достижений и случайные награды воздействуют на поведение и мотивацию потребителя по-разному, и если сопоставить эти механики с показателями качества, можно обоснованно выбирать те решения, которые реально повышают результативность обслуживания (см. Таблицу 3).

Таблица 3.

Результативность игровых механик по показателям вовлеченности

Тип механики	Примеры	Рост активных действий	Рост участия в акциях	Влияние на эмоциональную вовлеченность
Собираательные механики	Баллы, коллекции, накопления	+20%	+10 п.п.	Среднее
Механики достижений	Уровни, бейджи, статусы	+35%	+18 п.п.	Высокое
Случайные награды	Розыгрыши, бонусные открытия	+25%	+22 п.п.	Очень высокое
Сюжетные сценарии	Квесты, миссии, истории	+28%	+15 п.п.	Высокое

Составлено авторами на основании данных и методических подходов, представленных в работах о геймификации в маркетинговых коммуникациях и повышении вовлеченности потребителей в цифровой среде, в том числе на основании источников [2], [3], [4], [6], [8], [11].

Игровые механики по-разному служат целям маркетинга и управления клиентским опытом. Собираательные механики дают умеренный, но зато устойчивый рост активности, и хорошо работают там, где стоит задача удержать клиента на долгую перспективу. Механики достижений уместны, когда нужно выстроить своего рода «карьерную» траекторию клиента и закрепить у него привычку к регулярным действиям. Механики случайных наград раскрывают себя иначе: они лучше всего проявляют себя в коротких акциях, дающих быстрый всплеск участия [5].

Сюжетные сценарии выделяются на этом фоне: они вызывают самый глубокий эмоциональный отклик и дольше всех удерживают интерес аудитории к бренду. К ним стоит обращаться, когда задача выходит за пределы разовой активности, когда организация хочет вырастить у потребителя настоящую привязанность к сервису, собрать вокруг бренда сообщество единомышленников и поднять то, как клиент воспринимает ценность продукта. Именно поэтому различия между механиками так важны для системы оценки результативности управления качеством: они позволяют осмысленно подбирать механику под конкретную управленческую цель, будь то удержание клиента на длинной дистанции, быстрый рост участия в отдельной акции или устойчивость положительного опыта взаимодействия с сервисом [7].

Опираясь на анализ теоретических источников и вторичных эмпирических данных, логично предложить рассматривать показатели геймификации как элемент расширенной системы оценки результативности управления качеством. Эти показатели не отменяют традиционные критерии, а добавляют им дополнительную силу, измеряя реальное поведение клиента в цифровой среде и показывая, действительно ли процессы обслуживания создают для потребителя настоящую ценность (см Таблицу 4).

Таблица 4.

Интеграция показателей геймификации в систему оценки результативности СМК

Блок оценки	Традиционные показатели	Дополнительные показатели геймификации	Управленческий вывод
Результативность процессов	Выполнение целей процесса, соблюдение сроков, отсутствие несоответствий	Частота входов, глубина сценария, completion rate	Оценивается реальная ценность процесса для клиента
Ориентация на потребителя	Удовлетворенность, жалобы, обращения	NPS, retention, повторные действия	Измеряется устойчивость позитивного клиентского опыта
Улучшение процессов	Корректирующие действия, инициативы по улучшению	Реакция на новые механики, участие в тестах и пилотах	Оценивается воспринимаемая полезность изменений
Цифровое качество сервиса	Технические и процессные KPI	Участие в миссиях, выполнение заданий, отклик на игровые стимулы	Выявляется уровень удобства и мотивационной силы интерфейса

Составлено авторами на основании методических подходов к оценке результативности СМК, представленных в работах [2], [3], [4], [6], [8], [11], а также исследований влияния геймификации на вовлеченность и лояльность потребителей.

Практика оценки результативности СМК давно опирается на весовые коэффициенты и интегральные показатели, с помощью которых удастся свести результативность отдельных процессов и всей системы в единую картину. Для организаций, работающих в цифровой среде, естественно предложить интегральный показатель, который объединит традиционный и цифровой блоки оценки.

В прикладном виде такую модель можно представить как совокупность четырех укрупненных компонентов: процессная результативность, удовлетворенность потребителя, цифровая вовлеченность и устойчивость лояльности. Для организации с развитыми цифровыми сервисами структура весов может выглядеть так: процессная результативность 0.35, удовлетворенность потребителей 0.25, цифровая вовлеченность 0.20, лояльность и удержание 0.20. В основе такой логики лежит не единственный критерий, а совокупность взаимосвязанных индикаторов, которые одновременно отражают и формальную, и поведенческую стороны работы системы [8].

Пример агрегированной оценки результативности управления качеством дан в таблице 5. Она составлена авторами на основе методических подходов Бояджи К.С. и Редько Л.А., а также исследований, посвященных геймификации как инструменту повышения вовлеченности потребителей.

Таблица 5.

Пример агрегированной оценки результативности управления качеством

Компонент интегральной оценки	Весовой коэффициент	Пример частной оценки	Взвешенный вклад
Результативность процессов	0.35	0.82	0.287
Удовлетворенность потребителей	0.25	0.78	0.195
Цифровая вовлеченность	0.20	0.80	0.160
Лояльность и удержание	0.20	0.76	0.152
Интегральная оценка результативности	1.00	—	0.794

Составлено авторами на основании методических подходов к оценке результативности СМК и опубликованных данных о влиянии геймификации на вовлеченность и лояльность потребителей, на основании источников [2], [3], [4], [6], [8], [11].

Значение интегральной оценки 0,794 соответствует высокому, но не предельному уровню зрелости системы. Согласно шкале уровней зрелости СМК, принятой в ГОСТ Р ISO 10014-2008, подобное значение означает, что цели процессов в целом достигаются, а удовлетворенность потребителей держится на приемлемом уровне, однако система еще не вышла на стадию полного охвата всех областей улучшения. В данном контексте резерв для улучшения сохраняется в части цифровой вовлеченности и закрепления лояльности клиентов на длительном горизонте [1].

Сильными сторонами системы, судя по структуре интегральной оценки, выступают процессная результативность и удовлетворенность потребителей, мы видим, что оба показателя превышают 0.78, что говорит о стабильности базовых процедур, контроле несоответствий и позитивной внешней оценке качества сервисов. Цифровая вовлеченность и лояльность/удержание при значениях 0.80 и 0.76 демонстрируют устойчивую базу, но не исчерпывают потенциал вовлечения и привязанности аудитории к цифровым каналам организации [6].

С управленческой точки зрения это означает необходимость сосредоточиться на развитии клиентского опыта в цифровой среде: совершенствовать интерфейсы, усиливать геймифицированные сценарии, повышать персонализацию и прозрачность вознаграждений, выстраивать системную работу с обратной связью [3]. Дополнительным резервом роста может стать увязка программ лояльности с игровыми механиками и ключевыми процессами обслуживания, тогда рост цифровой активности будет напрямую конвертироваться в рост интегрального показателя качества [7].

Обсуждение результатов

Проведенный анализ подтверждает тезис о том, что геймификация в условиях цифровой экономики выходит за пределы маркетингового инструментария и приобретает функцию косвенного индикатора качества клиентских процессов. Ее результативность проявляется через набор статистически интерпретируемых показателей: рост активности на 30%, увеличение участия в акциях на 17 п.п., рост повторных покупок на 10 п.п., повышение среднего NPS на 1.3 пункта и рост доли промоутеров на 12 п.п. [3]. Эти данные отражают поведенческое и эмоциональное принятие потребителем цифрового сервиса и потому могут применяться для анализа фактической потребительской ценности процессов.

Вместе с тем модель имеет ряд ограничений. Часть эффектов геймификации связана с новизной механик и способна ослабевать с течением времени [7]. Разные сегменты аудитории воспринимают игровые элементы неодинаково, что требует сегментированного анализа при интерпретации данных. Наконец, показатели цифровой вовлеченности должны рассматриваться в совокупности с традиционными критериями СМК, а не как их замена.

Заключение

Геймификация выступает действенным инструментом повышения вовлеченности потребителей, формирующим статистически измеримый эффект, а также рост активности, retention, повторных действий, NPS и эмоциональной вовлеченности. Эти показатели допустимо интегрировать в систему оценки результативности управления качеством как дополнительный аналитический блок, отражающий действительное

восприятие клиентом качества цифровых процессов. Научная новизна работы состоит в обосновании связи между геймификацией и оценкой результативности СМК через включение цифрово-поведенческих и лояльных показателей в структуру качества. Практическая значимость заключается в применимости предложенной модели для организаций, развивающих мобильные приложения, интернет-магазины, экосистемные сервисы и программы лояльности как элементы клиентского опыта и качества обслуживания.

References

1. ГОСТ Р ISO 10014-2008. Менеджмент организации. Руководящие указания по достижению экономического эффекта в системе менеджмента качества. М.: Стандартиформ, 2009. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/123464/47-49.pdf?sequence=1> (дата обращения: 09.07.2026).
2. Бояджи К.С. Метод оценки результативности системы менеджмента качества испытательной лаборатории / К.С. Бояджи; науч. рук. Л.Г. Мишура // Сборник материалов Университета ИТМО. URL: <https://kmu.itmo.ru/file/download/application/25055> (дата обращения: 08.07.2026).
3. Геймификация в маркетинге как инструмент повышения вовлеченности потребителей // CyberLeninka. 2025. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geymifikatsiya-v-marketinge-kak-instrument-povysheniya-vovlechennosti-potrebiteley> (дата обращения: 08.07.2026).
4. Геймификация как инновационный инструмент для вовлечения клиентов в маркетинговые коммуникации // Электронная библиотека БГУ. URL: https://elibr.bsu.by/bitstream/123456789/267089/1/zagday_mag.pdf (дата обращения: 08.07.2026).
5. Козловская А.В. Геймификация как эффективный инструмент управления качеством: бакалаврская работа. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск, 2020. URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/61068> (дата обращения: 08.07.2026).
6. К вопросу об оценке результативности и эффективности СМК промышленных предприятий // CyberLeninka. 2024. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-otsenke-rezultativnosti-i-effektivnosti-smk-promyshlennyh-predpriyatiy> (дата обращения: 09.07.2026).
7. Повышение вовлеченности потребителей через элементы геймификации // 1economic.ru. 2026. URL: <https://1economic.ru/lib/124130> (дата обращения: 08.07.2026).

8. Обзор методов оценки результативности на примере системы менеджмента качества // Электронный архив УрФУ. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/109226/1/fti_2021_009.pdf (дата обращения: 08.07.2026).

9. Привлечение, удержание и возвращение потребителя посредством геймификации // BCI Marketing. 2020. URL: https://www.bci-marketing.ru/2020/pm20_08_19.pdf (дата обращения: 08.07.2026).

10. Разработка методики оценки результативности СМК на промышленном предприятии // econf.rae.ru. 2025. URL: <https://econf.rae.ru/article/5972> (дата обращения: 08.07.2026).

11. Редько Л.А. Оценка результативности системы менеджмента качества / Л.А. Редько, С.Е. Сальков, Л.В. Червова // Вестник науки Сибири. 2013. № 3(9). С. 65–69. URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/16439> (дата обращения: 08.07.2026).

UDC 658.5:004.9

Prytkova E.A. Intelligent quality management of technological processes based on decentralized cyber-physical systems

Интеллектуальное управление качеством технологических процессов на основе децентрализованных киберфизических систем

Prytkova Evgeniya Andreevna,

Senior Lecturer at the Higher School of Industrial Engineering,
Pacific National University, Khabarovsk

Прыткова Евгения Андреевна,
старший преподаватель высшей школы промышленной инженерии,
Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Abstract. The article discusses the problems of quality management of technological processes in the context of centralized management systems and substantiates the need for a transition to intelligent quality management of technological processes based on decentralized cyber-physical systems. The functional areas of interaction between cyberphysical systems and humans have been identified, which makes it possible to fully automate operational control, ensure predictive quality control, minimize the influence of the human factor and reduce the level of defects. A control algorithm has been developed that includes continuous data collection, analysis using neural network forecasting models, automatic parameter adjustment, and coordination of actions between sites.

Keywords: intelligent quality management, decentralized cyber-physical systems, digital twin, neural network models, predictive analytics, control algorithm, Industrial Internet of Things.

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы управления качеством технологических процессов в условиях централизованных систем менеджмента и обоснована необходимость перехода к интеллектуальному управлению качеством техпроцессов на основе децентрализованных киберфизических систем. Определены функциональные зоны взаимодействия киберфизических систем и человека, что позволяет полностью автоматизировать операционный контроль, обеспечить предиктивный контроль качества, минимизировать влияние человеческого фактора и снизить уровень брака. Разработан алгоритм управления, включающий непрерывный сбор данных, их анализ с помощью нейросетевых моделей прогнозирования, автоматическую корректировку параметров и координацию действий между участками.

Ключевые слова: интеллектуальное управление качеством, децентрализованные киберфизические системы, цифровой двойник, нейросетевые модели, предиктивная аналитика, алгоритм управления, промышленный интернет вещей.

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

Введение. В современных экономических условиях российские промышленные предприятия сталкиваются с необходимостью радикального повышения эффективности производственных систем в условиях глобальной конкуренции и турбулентности внешней среды. Ключевым фактором конкурентоспособности становится способность производственной системы сохранять заданные параметры качества при воздействии различных возмущений. Традиционные централизованные

системы управления качеством, основанные на иерархической структуре и жестко регламентированных процедурах, все чаще демонстрируют свою неэффективность в быстро меняющихся условиях [1].

Основные проблемы централизованных систем включают замедленные процессы принятия решений, недостаточное вовлечение производственных подразделений в управление качеством, ограниченную прозрачность контроля и высокую зависимость от человеческого фактора. В условиях необходимости импортозамещения и оптимизации затрат традиционные методы контроля не обеспечивают требуемой оперативности, что приводит к накоплению брака, перерасходу материалов и снижению общей эффективности производства [2].

Актуальным направлением исследований является разработка децентрализованных систем управления качеством, основанных на интеграции цифровых технологий, киберфизических систем и методов машинного обучения. Такой подход позволяет распределить ответственность и полномочия между автономными узлами производственной системы, повысить гибкость и адаптивность к изменениям внешней среды, а также создать основу для непрерывного совершенствования процессов [3].

Основная часть. Традиционные концептуальные модели систем управления качеством исходили из предпосылки централизованного контроля и жёстко организованных процедур. В таких моделях управленческие функции выполняются выделенным отделом качества, а все подразделения предприятия ориентированы на строгое выполнение установленных стандартов и регламентов. Эти модели отличаются иерархической структурой, распределением ролей и акцентом на формализацию процессов, что хорошо подходит для стабильных производственных сред с низкой степенью вариативности.

Внедрение децентрализованной системы управления качеством на промышленном предприятии может стать значительным шагом в совершенствовании производственных процессов и повышении эффективности современных предприятий. При этом нельзя сводить систему децентрализованного управления только к организационному аспекту и влиянию на процессы человеческих решений. Цифровые технологии все более активно применяются на современных производственных предприятиях, что в производстве позволяет предприятиям:

- автоматизировать процессы;
- контролировать правильность осуществления процессов;
- собирать и анализировать большой объем информации, в том числе о производстве и качестве продукции и процессов;

– осуществлять не только управление производственными процессами, но и анализ текущих данных, а также реагировать на отклонения в процессах и их результатах машинного обучения, когда система сама стабилизирует и изменяет работу оборудования в зависимости от задач и полученных результатов (рис. 1).

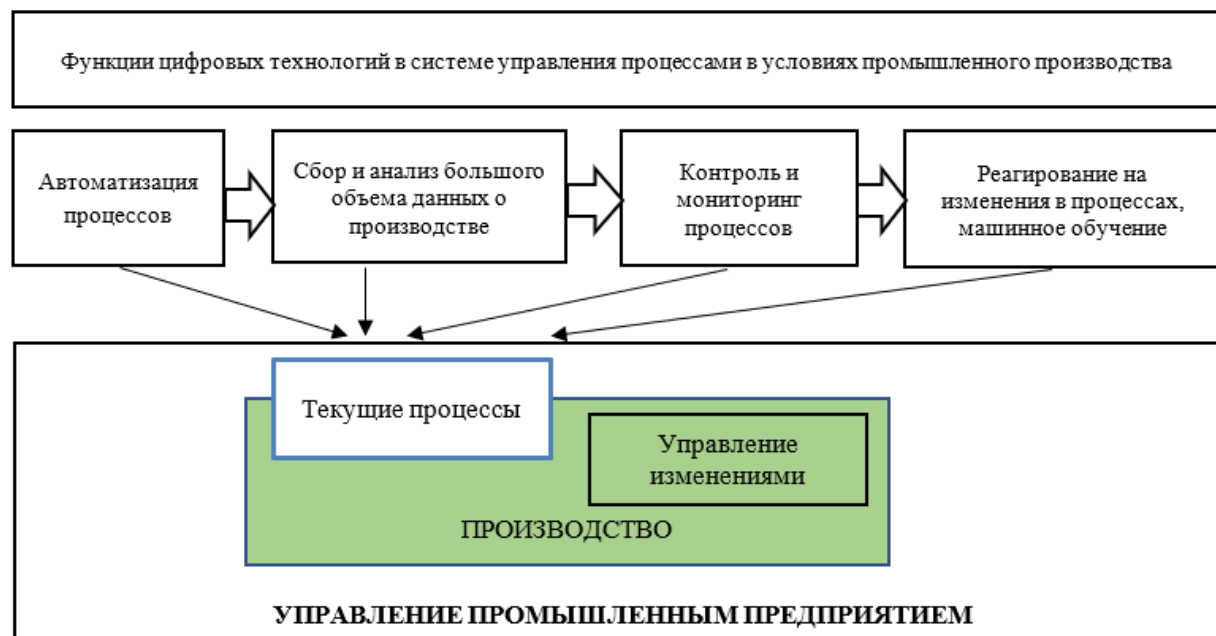


Рис. 1. Действующие в настоящее время зоны функционала цифровых технологий

Согласно рис. 1, функции цифровых технологий в системе управления процессами в условиях промышленного производства способствуют повышению эффективности, точности и скорости принятия решений, оптимизации производственных процессов и улучшению контроля над производством.

Рассмотрим корневые причины образования потерь в контексте оценки эффективности внедрения и использования инновационных цифровых технологий (табл. 1).

Таблица 1

Анализ корневых причин образования экономических потерь в связи с недостаточно эффективным использованием инновационных цифровых технологий на промышленных предприятиях

Экономические потери	Факторы образования	Корневые причины
1	2	3
1. Затраты времени и ресурсов на интеграцию данных между управляемыми системами, включающими управление производством, управление изменениями, управление предприятием	Сужена зона применения автоматизации и управления процессами: технологии применяются преимущественно в производственных системах, интеграция в рамках общего управления промышленными предприятиями, как правило, не осуществляется	Недостаточно полное применение возможностей цифровых технологий в промышленности. Не настроен и не используется следующий функционал: 1. Контроль и управление качеством процессов; 2. Управление тактическими корректировками процессов 3. Моделирование системы 4. Формирование рекомендаций по совершенствованию процессов 5. Подготовка и реинжиниринг процессов (например, через цифрового двойника)
2. Потери, связанные с недостаточно эффективной организацией процессов, нерациональным построением цепочки процессов		
3. Потери, связанные с недостаточно эффективным управлением элементами процессов: ресурсами, технологиями, управлением, исполнением, результатами	Технологии применяются для автоматизации текущих процессов, при этом машины, как правило, не участвуют в управлении изменениями. Управление качеством на промышленных предприятиях, как правило, ограничивается оценкой и анализом результатов процессов, но не поиском корневых причин; машины не участвуют в моделировании процессов, их улучшении, в проведении реинжиниринга, что говорит о недостаточном использовании возможностей цифровых механизмов	
4. Потери от несвоевременного обновления и совершенствования элементов процессов		

Таким образом, на сегодняшний день цифровые системы промышленных предприятий не готовы к самостоятельному автоматизированному осуществлению стратегических преобразований в процессах. Актуальным решением в данном случае это создание механизма, который будет основан на взаимодействии человека и машины с тенденцией к снижению доли участия человека. Для этого следует определить функциональные зоны машины и человека в сфере управления качеством на предприятии (табл. 2).

Таблица 2

Функциональные зоны цифровых технологий и человека в вопросах обеспечения стратегического технологического развития промышленных предприятий на основе децентрализованных механизмов управления качеством

Уровень управления изменениями	Функциональная зона цифровых технологий	Функциональная зона человека
1	2	3
1. Осуществление текущих производственных операций	Полная автоматизация за счет внедрения цифровых технологий (цифрового двойника)	На данном этапе полностью исключаем участие человека
2. Контроль соблюдения стандартов и уровня полученных результатов на этапе отдельных процессов. Децентрализованный уровень управления качеством	Полная автоматизация на основе использования цифровых технологий (киберфизические системы, big data, анализ данных)	На данном этапе полностью исключаем участие человека
3. Контроль эффективности состава, интеграции и взаимосвязи процессов на основе данных: - эффективности отдельных процессов; - эффективности производственной системы в целом; - эффективности деятельности предприятия на основе системы целевых показателей	1. Полная автоматизация расчета показателей эффективности. 2. Определение причин снижения качества в процессах. 3. Разработка рекомендаций по корректировке имеющейся структуры процессов, их интеграции	1. Анализ информации, сформированной цифровой системой. 2. Разработка решений по корректировке производственных процессов. 3. Настройка цифровой системы в соответствии с рекомендациями цифровой системы (либо самостоятельная настройка цифровой системой на основе соответствующих команд)
4. Реинжиниринг процессов на основе изменения внешней среды предприятия	1. Анализ данных о внешней среде, включающий поиск данных о рынке, конкурентах, основных потребителях, новых технологиях; поиск актуальных предложений по ресурсам, динамике территориального распределения основных контрагентов. 2. Анализ текущего уровня эффективности деятельности предприятия. 3. Моделирование будущей производственной системы. 4. Разработка схемы реинжиниринга процессов, производственной системы предприятия 5. Оценка будущей эффективности в результате проведения реинжиниринга	1. Анализ информации, сформированной цифровой системой. 2. Разработка решений по осуществлению реинжиниринга производственных процессов. 3. Настройка оборудования, систем, элементов процессов в рамках частичного либо полномасштабного реинжиниринга
5. Анализ эффективности масштабного технологического преобразования производственных систем	Полная автоматизация на основе использования цифровых технологий (киберфизические системы, big data, анализ данных)	1. Анализ информации, сформированной цифровой системой. 2. Если необходимо, разработка решений по корректировке производственных процессов

Согласно табл. 2, цифровая система может значительно улучшить процессы контроля и обеспечения качества продукции. Цифровые системы позволяют автоматизировать мониторинг качества на всех этапах производственного цикла.

В данной статье предлагается реализовать децентрализованную систему управления качеством, основанной на цифровой системе, что является инновационным подходом к организации процессов контроля и обеспечения качества продукции на промышленном предприятии. Данная система представляет собой совокупность автономных агентов, которые объединены внутренними связями и функционирующих на основе собственных ресурсов, групповой коммуникации, а также комбинации алгоритмов поведения.

На основании этого разработан алгоритм построения системы управления технологическими процессами на основе применения цифровых технологий и переходе на децентрализацию управления:

1 этап. Сбор данных в реальном времени. На этом этапе при помощи датчиков и контроллеров каждый автономный узел сформированной технологической системы в режиме реального времени непрерывно собирает информацию о параметрах технологического процесса (температура, давление, время выдержки, концентрация реагентов и др.).

2 этап. Анализ и прогнозирование. Собранные на первом этапе данные передаются в настроенную на определенные входные и выходные параметры нейросетевую модель. Алгоритм сравнивает прогнозные значения с нормативными требованиями и формирует рекомендации по корректировке режимов работы оборудования.

3 этап. Автоматическая корректировка параметров. Система настраивается на осуществление автоматической корректировке, если параметры процесса отклоняются от заложенных стандартных значений. Для обеспечения стабильного протекания технологического процесса.

4 этап. Координация между узлами. Результаты анализа передается на координации для возможности осуществления синхронизации действий на различных участках производственной системы, чтобы обеспечить согласованность действий.

5 этап. Стратегический анализ и совершенствование. На основании всех собранных данных осуществляется стратегический анализ эффективности системы управления качеством для разработки мероприятий для совершенствования технологических процессов.

Процессы принятия решений в таком виде распределены, а их взаимодействие на всех уровнях координируется саморегулирующимся механизмом. Предложен подход, сочетающий агентную координацию и распределенный мониторинг качества с учетом специфики технологического процесса, принципиальное отличие которого от существующих аналогов заключается в интеграции с механизмами менеджмента

качества процессов и использовании цифрового двойника для автоматической самонастройки параметров. Такой алгоритм становится ключевым инструментом управления и объединения отдельных компонентов системы в единое целое.

Децентрализованный алгоритм позволяет отдельным агентам оптимизировать свое поведение в зависимости от альтернативных действий внешней среды. В децентрализованных системах агенты выполняют системные рекомендации только с учетом оперативной обстановки и могут вносить коррективы в системные установки. Анализ решения проблемы отношения локальных и системных целей основан на проектировании снизу вверх.

Заключение. Децентрализованная система управления качеством помогает повысить гибкость производства. Цифровые технологии позволяют быстро адаптироваться к изменениям в рыночной среде и потребностям клиентов, оперативно вносить корректировки в производственные процессы и улучшать качество продукции. Это существенно увеличивает конкурентоспособность предприятия и способствует удовлетворению потребностей заказчиков.

Внедрение децентрализованной системы управления качеством на основе цифровой системы улучшает прозрачность и контролируемость производственных процессов. Благодаря возможности централизованного мониторинга всей цепочки производства с применением цифровых технологий, руководство предприятия получает полную информацию о текущем состоянии каждого этапа производства и может оперативно принимать решения для устранения задержек или недочетов;

References

1. Дранкова Н.А. Проблемы эффективности системы менеджмента качества и пути их решения в условиях новой экономической среды / Н.А. Дранкова, Я.В. Денисова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2023. № 1. С. 65-73.
2. Веселовский М.Я. Проблемы развития регионального машиностроения в контексте необходимости импортозамещения / М.Я. Веселовский, А.В. Федотов, Р.В. Фатдаков, Л.В. Усатова // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Экономика. 2023. № 2. С. 59-70.
3. Порсев К.И. Служба стандартизации на умном машиностроительном производстве в условиях Индустрии 4.0 / К.И. Порсев, В.А. Иванова // Компетентность. 2023. № 2. С. 18-21.
4. Булавин В.Ф. Цифровая трансформация технологического сопровождения производства в малых предприятиях / В.Ф. Булавин, Т.Г. Булавина, Д.В. Кошутин, В.В. Яхричев, А.С. Степанов // Известия вузов. Машиностроение. 2021. № 9 (738). С. 15-29.
5. Шлыков С.В. Применение методов машинного обучения для автоматизации процессов в нефтегазовой отрасли // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2023. № 2. С. 46-53.

TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS

UDC 332.14: 004.8

Gorbatov S.D., Pritulik M.A., Drabenko D.V. Artificial Intelligence in Urban Studies and Municipal Management

Искусственный интеллект в урбанистике и муниципальном управлении

Gorbatov Stepan Denisovich

student

GAOU VO LO "GGU"

Pritulik Mikhail Aleksandrovich

Student

GAOU VO LO "GGU"

Scientific supervisor

Drabenko Dmitry Vadimovich

Ph.D., Associate Professor of the Department of Digital Management

GAOU VO LO "GGU"

Горбатов Степан Денисович

студент

ГАОУ ВО ЛО "ГГУ"

Притулик Михаил Александрович

студент

ГАОУ ВО ЛО "ГГУ"

Научный руководитель

Драбенко Дмитрий Вадимович

к.т.н., доцент кафедры цифрового менеджмента

ГАОУ ВО ЛО "ГГУ"

Abstract. The article is devoted to the analysis of the application of artificial intelligence technologies in urban studies and municipal management. It examines the theoretical foundations of digital urbanism, as well as international and domestic experience in implementing AI solutions, including the generative design platform rTIM, the monitoring system of the Lakhta Center, and Moscow-based projects such as "Smart Intersection" and "Digital Twin of Moscow." Special attention is paid to the legal regulation of AI use in Russia, as well as the risks and limitations associated with the deployment of such systems. The authors conclude that artificial intelligence is becoming a strategic tool for transitioning from reactive to adaptive urban governance. However, its sustainable development requires improvement of the regulatory framework, ensuring algorithmic transparency, and training qualified personnel.

Keywords: artificial intelligence, urban studies, municipal management, smart city, digital twin, generative design, urban planning, transport planning, legal regulation, digital economy.

Аннотация. Статья посвящена анализу применения технологий искусственного интеллекта в урбанистике и муниципальном управлении. Рассматриваются теоретические основы цифровой урбанистики, международный и отечественный опыт внедрения ИИ-решений, включая платформу генеративного проектирования rTIM, систему мониторинга Лахта-Центра, московские проекты «Умный перекресток» и «Цифровой двойник Москвы». Отдельное внимание уделяется правовому регулированию использования ИИ в России, а также рискам и ограничениям, связанным с внедрением таких систем. Авторы приходят к выводу, что искусственный интеллект становится стратегическим инструментом перехода от реактивного к адаптивному

управлению городскими территориями, однако его устойчивое развитие требует совершенствования нормативной базы, обеспечения прозрачности алгоритмов и подготовки квалифицированных кадров.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, урбанистика, муниципальное управление, умный город, цифровой двойник, генеративное проектирование, градостроительство, транспортное планирование, правовое регулирование, цифровая экономика.*

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

Введение

Современный этап развития городов характеризуется рядом сложных социально-экономических и экологических вызовов, обусловленных увеличением численности городского населения, ростом транспортных нагрузок, ухудшением экологической обстановки и недостаточностью инфраструктуры. Эти факторы создают объективную необходимость в поиске инновационных подходов к управлению городскими территориями. Одним из наиболее перспективных направлений становится применение технологий искусственного интеллекта (ИИ), позволяющих существенно повысить эффективность городских процессов и обеспечить устойчивое развитие населенных пунктов.

Значимость рассматриваемого вопроса подчеркивается наличием соответствующих стратегических документов Российской Федерации, среди которых особое внимание заслуживает Указ Президента РФ № 490 «О развитии искусственного интеллекта», определяющий приоритетные направления разработки и внедрения ИИ в государственных системах управления, а также Национальная стратегия развития искусственного интеллекта до 2030 года и Федеральный закон «О градостроительной деятельности», предусматривающие интеграцию цифровых платформ в систему муниципального управления.

Целью данной статьи является анализ ключевых аспектов применения искусственного интеллекта в урбанистике и определение перспектив развития данных технологий в системе муниципального управления. Для этого авторы обращаются к теоретико-методологическим основам цифровой урбанистики, рассматривают отечественный опыт реализации ИИ-проектов на примере платформы rTİM и решений Правительства Москвы, а также анализируют риски, ограничения и потенциал масштабирования данной практики в российских муниципалитетах

1. Основы применения ИИ в урбанистике

Современная цифровая урбанистика рассматривает город как гибридное пространство, где физическая инфраструктура взаимодействует с цифровыми

потоками данных. Как отмечается в лекции НИУ ВШЭ «Что такое цифровая урбанистика?» [7], город перестаёт быть просто пространством зданий и улиц — он превращается в «цифровой организм», состоящий из множества взаимосвязанных слоёв: транспортных, социальных, энергетических и коммуникационных. Ключевая роль в этом процессе отводится ИИ. Алгоритмы машинного обучения позволяют анализировать поведение жителей, предсказывать потребности, управлять транспортными потоками и моделировать инфраструктурные решения.

Концепция «умного города» базируется на четырёх технологических опорах: интернете вещей (экосистема устройств, которые могут взаимодействовать друг с другом и передавать данные в режиме реального времени), big data, компьютерном зрении и цифровых двойниках (динамическая, постоянно обновляющаяся виртуальная модель физического объекта, процесса или системы).

Последние используются для моделирования развития городов в реальном времени, что позволяет принимать решения на основе симуляций и прогнозов. Применение таких подходов уже изменило роль урбаниста: если раньше он был архитектором и планировщиком, то теперь становится аналитиком данных, способным работать с цифровыми моделями города.

В России такие идеи активно поддерживаются государственными стратегиями, в частности проектом «Цифровая экономика» и федеральной программой «Умный город», ориентированной на внедрение ИИ и автоматизацию управления инфраструктурой на уровне муниципалитетов.

2. Практическая часть. Применение ИИ в международной урбанистике

Искусственный интеллект (ИИ) активно внедряется в различные сферы городского планирования и управления, предлагая инновационные решения для повышения эффективности городской инфраструктуры, улучшения качества жизни горожан и устойчивого развития мегаполисов. Проанализируем ключевые международные практики применения искусственного интеллекта в данной сфере

Управление городским транспортом: Одним из ключевых направлений является оптимизация транспортных потоков. Например, в Сингапуре используется система интеллектуальной транспортной сети (ITS), основанная на технологиях ИИ. Эта система собирает данные о движении транспорта в режиме реального времени и помогает властям оперативно реагировать на пробки, аварии и другие проблемы. Это позволяет значительно сократить заторы и повысить общую эффективность городских перевозок.

Мониторинг окружающей среды: В Пекине внедрена система предсказания уровня загрязнения воздуха. Она основана на анализе исторических данных и погодных

условий, позволяя властям заранее предупреждать население о возможных проблемах и принимать превентивные меры.

Безопасность и общественное пространство: В Амстердаме реализуется проект "Smart Lighting", где уличные фонари оснащены датчиками движения и освещения. Благодаря этому освещение регулируется в зависимости от наличия людей, что способствует экономии энергии и повышению безопасности в ночное время.

Энергосбережение и устойчивое развитие: Использование ИИ способствует развитию экологически чистых технологий. В Копенгагене реализован проект "Climate Adaptation Plan", включающий использование ИИ для анализа климатических изменений и разработки мер адаптации. Городские власти применяют технологии ИИ для моделирования последствий изменения климата и принятия решений по снижению углеродного следа.

3. Практическая часть. Применение ИИ в отечественной урбанистике

В последние годы в России появились конкретные примеры внедрения искусственного интеллекта в градостроительную практику. Одним из наиболее показательных кейсов является платформа rTIM, разработанная компанией *Rocket Group*. По словам руководителя проекта Сергей Иванович Кудинов (видео *TechnoBuild 100+*), rTIM представляет собой систему генеративного проектирования территорий, которая способна за считанные часы создавать десятки вариантов планировочных решений, соответствующих градостроительным нормативам.

Совместно с Фондом ДОМ.РФ rTIM применялась для быстрой генерации концепций жилых районов. По данным портала АНСБ (Агентство новостей строительный бизнес), за сутки система сформировала множество альтернативных планировок, практически идентичных ручным проектам, что позволило сократить время проектирования в 2–3 раза. Кроме того, rTIM автоматически рассчитывает технико-экономические показатели (ТЭП) — плотность застройки, количество парковочных мест, потребность в социальной инфраструктуре.

Отдельного внимания заслуживает региональная практика. На Сахалине осуществляется интеграция rTIM с региональной ГИСОГД (государственная информационная система обеспечения градостроительной деятельности) и Национальной системой пространственных данных (НСПД), что делает возможным автоматизированное формирование градостроительных решений и сценариев развития территорий. Это пример того, как искусственный интеллект становится частью государственного управления.

В Москве ИИ применяется в рамках проектов «Умный перекрёсток» (регулирование транспортных потоков), «Цифровой двойник Москвы» (моделирование

городской среды в реальном времени), цифрового нормоконтроля (проверка проектной документации) и Квартирографии (автоматизированного анализа жилого фонда). Все эти инициативы направлены на снижение бюрократической нагрузки, повышение прозрачности процессов и улучшение управляемости городскими системами.

Лахта-Центр и цифровой двойник. В «Лахта-Центре» реализована одна из наиболее сложных и полноценных систем мониторинга конструкций в России. В состав системы входят около 3 000 датчиков (тензометры, акселерометры, наклонометры, датчики давления и др.), соединённых в единую платформу, которая обрабатывает данные и сравнивает их с прогнозными моделями — тем самым адаптируя модель здания к фактическому состоянию. [8]

Платформа SODIS Building M4 служит цифровым двойником: она объединяет BIM-модель, данные сенсоров и алгоритмы анализа, что позволяет уточнять нагрузки, выявлять отклонения, корректировать модель и выдавать рекомендации по обслуживанию. [9] Система мониторинга охватывает фундамент, сваи, коробчатый фундамент и надземную часть здания, включая шпиль, и постоянно отслеживает изменения, что делает её инструментом не только для эксплуатации, но и для раннего предупреждения.

4. Правовое регулирование использования Искусственного интеллекта в урбанистике России

Правовое регулирование применения искусственного интеллекта в Российской Федерации находится в стадии активного формирования. Несмотря на значительный технологический прогресс, нормативная база в области урбанистики и цифрового управления городами пока остаётся неполной. Тем не менее, уже сегодня можно выделить несколько направлений развития правовой среды, закреплённых в документах государственной политики и научных исследованиях.

Основополагающим документом является Указ Президента РФ № 490 от 10 октября 2019 года «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации», где ИИ определяется как совокупность технологических решений, способных выполнять функции, традиционно требующие человеческого интеллекта. В развитие этого указа была утверждена Национальная стратегия развития искусственного интеллекта до 2030 года, определяющая задачи по формированию правовой базы, обеспечивающей этичное, безопасное и ответственное использование ИИ во всех отраслях, включая городское управление.

В 2021 году в Москве введён экспериментальный правовой режим (ЭПР) для разработки и официального одобрения технологий ИИ. Этот режим, предусмотренный федеральным законом № 123-ФЗ «Об экспериментальных правовых режимах в сфере

цифровых инноваций», позволяет организациям тестировать ИИ-сервисы без применения некоторых устаревших правовых ограничений. Опыт Москвы показывает, что подобная правовая гибкость способствует внедрению решений в области цифровых сервисов, градостроительного моделирования и управления городской инфраструктурой.

Как отмечается в исследовании И.А. Филипповой (*Государство и право*, 2023), одной из главных проблем регулирования является отсутствие чёткого распределения ответственности между разработчиками, операторами и пользователями ИИ-систем. В урбанистике это имеет особое значение, поскольку ошибки алгоритмов могут повлечь за собой социальные, экономические и инфраструктурные последствия.

5. Выводы. Риски, развитие и перспективы

Применение искусственного интеллекта в российской урбанистике уже доказало свою эффективность. Но, в данный момент система ИИ имеет ограничения в использовании.

Система мониторинга Лахта-Центра не является цифровым двойником в полном смысле слова, а служит источником данных для его построения. Она фиксирует состояние конструкций здания с помощью множества датчиков и передаёт эти данные в математическую модель, которая отражает поведение объекта в реальном времени. Таким образом, цифровой двойник формируется на основе поступающей информации и позволяет анализировать динамику нагрузок, выявлять отклонения и прогнозировать возможные риски.

При этом система остаётся полуавтоматической: инженеры и аналитики продолжают контролировать и корректировать результаты, особенно в ситуациях, когда показания датчиков выходят за ожидаемые пределы. Для стабильной работы необходима высокая точность измерений, регулярная калибровка сенсоров и надёжные алгоритмы анализа, иначе возможны ложные сигналы или пропуск критических изменений.

Несмотря на масштабность и технологическую сложность этой системы мониторинга, подобные решения пока редки в российской практике. Большинство проектов всё ещё находятся на стадии испытаний или пилотного внедрения, что говорит о раннем этапе развития цифровых двойников в отечественном строительстве и урбанистике.

Перспективы дальнейшего развития связаны с созданием сквозных систем управления, объединяющих проектирование, реализацию и эксплуатацию инфраструктуры. На следующем этапе эволюции можно ожидать появления

самообучающихся городских платформ, способных автоматически реагировать на изменения в городской среде.

Для устойчивого внедрения ИИ в урбанистику необходимо:

- развивать нормативно-правовую базу, адаптируя её под цифровые технологии;
- обеспечивать прозрачность и аудит алгоритмов;
- инвестировать в подготовку кадров — специалистов, способных работать на стыке архитектуры, ИТ и аналитики данных.

Таким образом, искусственный интеллект становится не просто технологией, а стратегическим инструментом формирования будущего российских городов. Он позволяет перейти от реактивного управления к продуктивному и адаптивному — где город способен не только реагировать на изменения, но и предвидеть их.

References

1. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации : указ Президента Рос. Федерации от 10 окт. 2019 г. № 490 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2019. – № 41. – Ст. 5700.
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации : федер. закон от 29 дек. 2004 г. № 190-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2005. – № 1, ч. 1. – Ст. 16.
3. Об информации, информационных технологиях и о защите информации : федер. закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2006. – № 31, ч. 1. – Ст. 3448.
4. Об экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых инноваций : федер. закон от 31 июля 2020 г. № 258-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2020. – № 31, ч. 1. – Ст. 5018.
5. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта до 2030 года [Электронный ресурс] // Официальный сайт ai.gov.ru. – URL: <https://ai.gov.ru/ai/documents/national-strategy> (дата обращения: 08.10.2025).
6. Паспорт федерального проекта «Умный город» [Электронный ресурс] // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. – URL: <https://smartcity.rf> (дата обращения: 08.10.2025).
7. Использование искусственного интеллекта при проектировании и строительстве «Лахта-центра» в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс] // Habr. – URL: <https://habr.com/ru/companies/lakhtacenter/articles/414549/> (дата обращения: 08.10.2025).

8. Применение технологии «Цифровой двойник» в экосистеме Лахта-центра [Электронный ресурс] // Digital-Build.ru. – URL: <https://digital-build.ru/czifrovoj-dvojn timer-kak-tehnologiya-rabotaet-na-praktike/> (дата обращения: 08.10.2025).

9. Рокет Групп. Платформа rTIM – генеративное проектирование территорий [Электронный ресурс]. – URL: <https://rtim.city> (дата обращения: 08.10.2025).

10. Кудинов, С. Направления AI в урбанистике [Электронный ресурс] : видеозапись выступления // TechnoBuild 100+ : YouTube-канал. – 2023. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=wIjITmYk4Ug> (дата обращения: 08.10.2025).

11. Что такое цифровая урбанистика? Цифровые кладбища и совмещение реального и виртуального города [Электронный ресурс] : видеозапись лекции // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – URL: <https://www.hse.ru/video/> (дата обращения: 08.10.2025).

12. Филиппова, И. А. Правовые проблемы использования искусственного интеллекта в городском управлении / И. А. Филиппова // Государство и право. – 2023. – № 4. – С. 112–119.

13. Батурин, В. К. Цифровые двойники в градостроительстве: опыт и перспективы / В. К. Батурин, А. С. Петров // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 6. – С. 734–745.

14. Аллен, М. Умные города: технологии, управление, устойчивое развитие / М. Аллен, П. Кларк ; пер. с англ. – М. : Альпина Паблишер, 2021. – 312 с.

15. Паринов, С. И. Экономика умных городов: цифровые платформы и искусственный интеллект / С. И. Паринов // Информационное общество. – 2023. – № 2. – С. 23–33.

UDC 01

Krasnova M.N. Development of a universal reconfigurable assembly jig for aircraft wing panels

Разработка универсального переналаживаемого стапеля
для сборки панелей крыла самолета

Krasnova Marina Nikolaevna,

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Honorary Worker of Education of the Russian Federation

Краснова Марина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
почетный работник сферы образования Российской Федерации

Abstract. This article examines the challenges associated with assembly jig tooling when transitioning from the production of a left-hand aircraft wing panel to a right-hand one. A design for a universal assembly jig featuring quick-change supports is proposed. Key design solutions are described, including a standardized mounting flange, a gas strut for positioning, and a system of locking pins (both conventional and ball-lock types). Materials for the load-bearing components were selected. Results from 3D modeling in Kompas-3D and finite element analysis are presented. The practical significance of the development and its role in enhancing the flexibility of aircraft manufacturing are demonstrated.

Keywords: assembly jig, wing panel, rapid reconfiguration, gas strut, locking pins, positioning accuracy, Kompas-3D, aircraft manufacturing.

Аннотация. В статье рассмотрены проблемы стапельной оснастки при переходе с производства левой панели крыла самолета на правую. Предложена конструкция универсального стапеля с быстросменными опорами. Описаны основные конструктивные решения: унифицированный фланец крепления, газовый амортизатор для позиционирования, система стопорных штифтов (классических и шариковых). Выполнен выбор материала несущих элементов. Приведены результаты 3D-моделирования в среде Kompas-3D и конечно-элементного анализа. Показана практическая значимость разработки и повышения гибкости авиастроительного производства.

Ключевые слова: стапель, панель крыла, быстрая переналадка, газовый амортизатор, стопорные штифты, точность позиционирования, Kompas-3D, авиастроение.

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

Введение

Сборочная оснастка (стапель) занимает центральное место в производстве агрегатов летательных аппаратов, особенно при сборке кессонных частей крыла. Крыло самолета воспринимает основные аэродинамические и инерционные нагрузки, поэтому его геометрическая точность, жесткость и герметичность напрямую определяют летные характеристики и безопасность. В свою очередь, стапель является сборочным приспособлением, которое фиксирует элементы крыла в требуемом положении, обеспечивая их соосность, параллельность и заданные зазоры перед клепкой и герметизацией.

Целью данной работы является создание конструкции стапеля для сборки панелей крыла, обеспечивающей быструю и точную переналадку между левой и правой конфигурациями с минимальными затратами времени и сохранением требуемой точности взаимного расположения элементов. Под «быстрой переналадкой» понимается способность перейти с левой стороны на правую (и обратно), без использования подъемных механизмов и измерительного оборудования.

Основные задачи и методы исследования

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Анализ существующих конструкций стапелей для панелей крыла и выявление их недостатков.
2. Разработка концепции быстрой смены опор.
3. Выбор и расчет механизма точного позиционирования опор.
4. Проектирование системы фиксации опор в рабочем положении.
5. Выбор материала для несущих элементов стапеля.
6. 3D-моделирование и выпуск конструкторской документации. Расчет конструкции на прочность в программе APM Studio

Методы исследования включают анализ технической литературы, параметрическое 3D-моделирование, конечно-элементный прочностной расчет, а также сравнительную оценку технико-экономических параметров.

Анализ и сравнение разработанной конструкции с существующей оснасткой

Для объективной оценки эффективности предложенного универсального переналаживаемого стапеля проведён сравнительный анализ типовыми видами оснастки, применяемыми в авиастроении: стационарный стапель под одно типоразмерное изделие и модульный стапель с универсальными опорами (без быстросменных ложементов). Критериями сравнения выбраны: время переналадки между левой и правой панелями крыла, требуемая производственная площадь, точность позиционирования, трудоёмкость контроля прилегания, стоимость оснастки (относительная) и необходимость внешних коммуникаций.

Время переналадки

Стационарный стапель – переналадка физически невозможна; требуется демонтаж всей оснастки и монтаж новой (от нескольких дней до недель).

Модульный стапель – перестановка универсальных опор требует повторной выставки по лазерному трекеру; время – 2–4 часа.

Предлагаемая конструкция – смена опоры ложементов на противоположную сторону колонны с использованием шариковых стопорных штифтов и газового амортизатора занимает не более 5–10 минут на одну опору (без измерительного оборудования). Благодаря унифицированному фланцу и направляющим штифтам достигается «фиксация по месту» без юстировки.

Занимаемая площадь (на одну конфигурацию)

Стационарный – для левой и правой панелей требуется два стапеля → удвоенная площадь.

Модульный – один стапель, площадь сопоставима со стационарным.

Предлагаемый – один стапель, площадь такая же, как у стационарного для одной панели. При этом отпадает необходимость в хранении второго комплекта оснастки.

Контроль прилегания панели

Стационарный – хороший доступ к зонам стыковки (стапель часто открытый).

Модульный – из-за наличия множества универсальных регулируемых опор часто затруднён визуальный и щуповой контроль прилегания.

Предлагаемый – ложементы выполнены с учётом аэродинамического контура, зоны контроля остаются открытыми. Отсутствие громоздких регулировочных узлов улучшает обзор.

Конструктивные решения

Сформулированы требования к новой конструкции: разделение несущей колонны и сменной опоры ложементов; использование стандартного крепежа (болты М30); внедрение механизмов точного позиционирования опор.

Разработанная идея перестановки опоры ложементов для левой и правой стороны колонны крепится опора (ответная часть опоры ложементов).

При переходе от комплектации панели для левой части необходимо перестановка ложементов для комплектации другой части. Для минимизации ошибки при установке опор были рассмотрены два типа устройств:

- Пневмоцилиндр двойного действия – обеспечивает усилие прижатия до 5000 Н, позволяет дистанционно управлять позиционированием от заводской пневмосети (давление 0,4–0,6 МПа). Основной недостаток: необходимость подачи сжатого воздуха.
- Газовый амортизатор (газовая пружина) – автономен, не требует внешних коммуникаций, создает усилие до 2000 Н. Менее стабилен при низких температурах (снижение усилия на 20–30%).

После позиционирования опора должна быть жестко зафиксирована для предотвращения смещений из-за вибраций при сборке панели. Для этого могут быть использованы стопорные штифты двух типов:

- Классический стопорный штифт с рукояткой и пружиной – надежный, простой, но требует ручного забивания.
- Шариковый стопорный штифт (шариковый замок) – быстродействующий, фиксация происходит автоматически при вставке опоры, отпирание нажатием кнопки.

При выборе материала были проанализированы стали: Ст3 (низкая стоимость, но недостаточная прочность при длительной эксплуатации), 09Г2С (хорошая свариваемость, но меньшая износостойкость), 16Г2АФ (оптимальное сочетание прочности, свариваемости и вязкости при низких температурах).

Таблица 1

Сравнение материалов для несущих элементов стапеля

Марка стали	Предел текучести, МПа	Свариваемость	Износостойкость	Стоимость
Ст3	195–235	хорошая	низкая	низкая
09Г2С	345	хорошая	средняя	средняя
16Г2АФ	≥345	хорошая	высокая	средняя

Выбрана низколегированная сталь 16Г2АФ (0,14–0,19% С; 1,30–1,70% Мн; 0,05–0,12% V), обеспечивающая высокую прочность, свариваемость и вязкость при низких температурах. Для фундамента – бетон класса В15 (марка М200) по ГОСТ Р 70362-2022.

Для разработки и создания документации и 3D модели была использована программа Kompas-3D. В процессе разработки были созданы твердотельные 3D модели каждого элемента стапеля:

- фундамент;
- колонна;
- опора;
- опора ложементов.

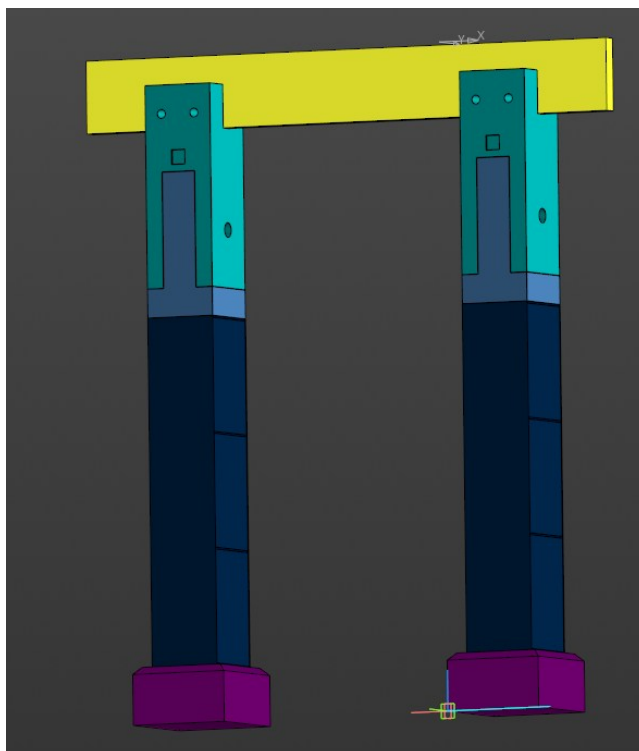


Рисунок 1. Сборка узла из элементов

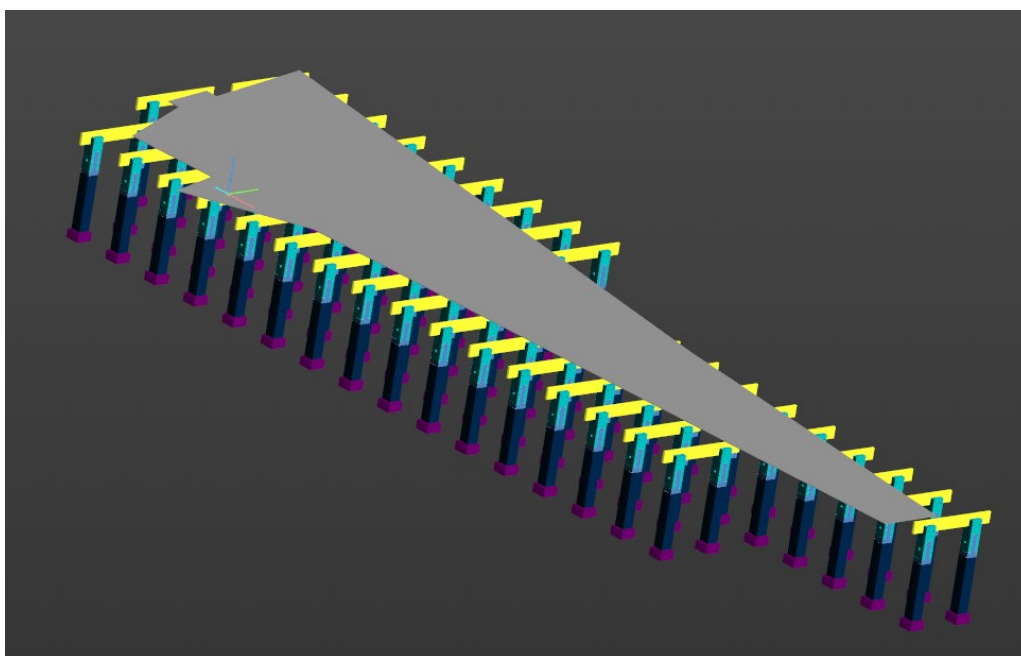


Рисунок 2. Проектирование стапеля в Компас 3D

После создания моделей в программе компас 3D и создания сборки в программу APM Studio была загружена полноценная сборка стапеля, однако входе работы, произведения расчётов возникло несколько проблем:

Во-первых, при установке точек закрепления, построении конечно -элементных сеток, наложения областей нагрузок приложение очень сильно «тормозило» ввиду большого количества элементов.

Во-вторых, в библиотеке материалов не было тех, которые подобраны в ходе работы в Компас 3D.

Чтобы решить данные проблемы были приняты следующие решения. Первое- был произведён расчёт площадей панелей и нагрузки, которые возникают при наложении плит на ложементы стапеля. После чего был взят один из узлов и рассчитана сила, действующая на площадь ложемента стапеля. Далее были произведены нагрузки в соответствии с расчётами. Второе – были подобраны наиболее близкие материалы, но для материала ложемента стапеля не было найдено полноценных аналогов и был выбран материал дуб, что повлияло на деформацию при нагружении.

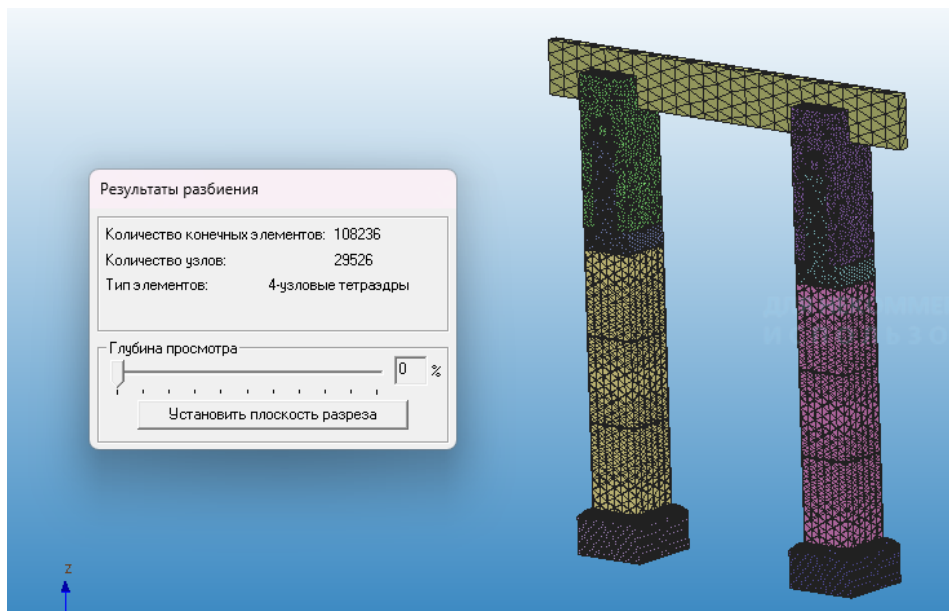


Рисунок 3. Создание конечно -элементной сетки

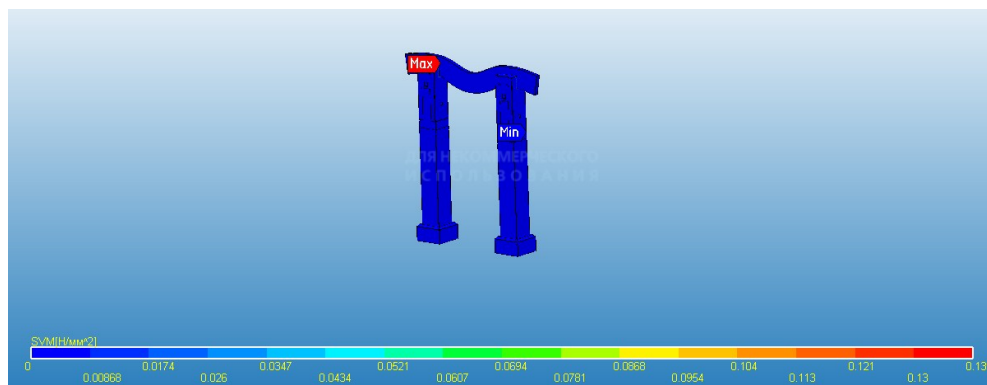


Рисунок 4. Результаты расчетов и построений

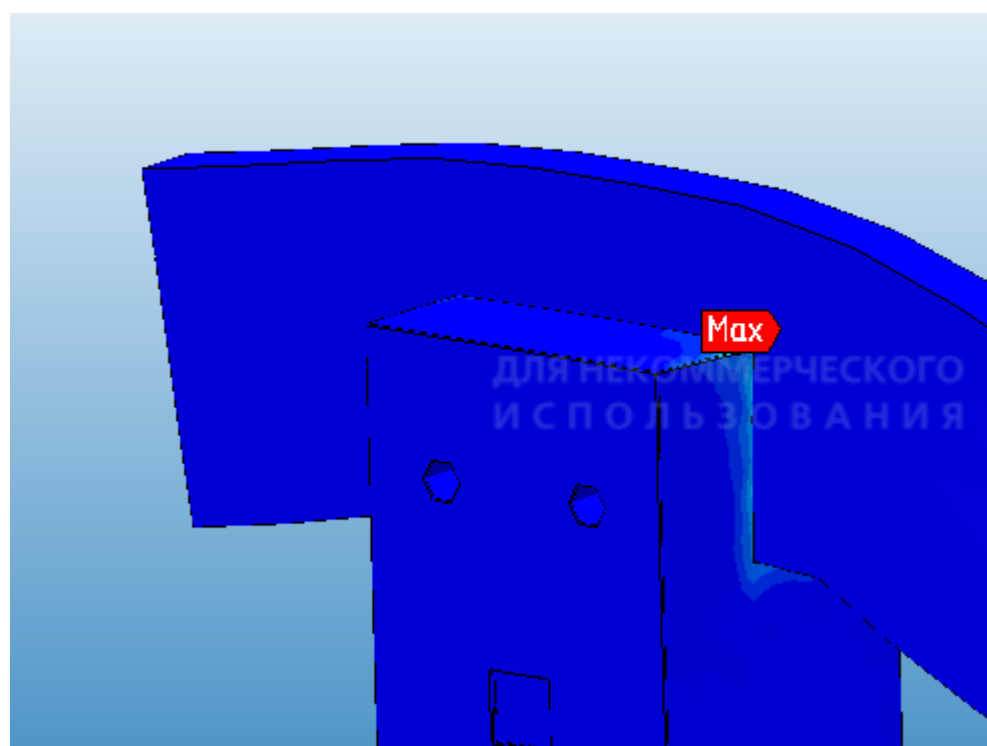


Рисунок 5. Результаты расчетов и построений

По результатам нагрузки видно, что деформирован был только ложемент стапеля, при выборе которого учитывался совершенно другой материал.

В результате выполнения работы был разработан универсальный переналаживаемый стапель для комплектации как левых, так и правых панелей крыла самолета.

Так же подобран крепеж, элементы фиксации, кратко описан принцип работы, разработана техническая документация в программе Компас 3D (чертежи, 3D модели).

В программе APM Studio создана конечная элементная сетка, визуализировано поведение разработанных элементов при приложении нагрузки.

References

1. Бехметев В.И., Гусева Р.И. Технология сборки летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 2025. – 312 с.
2. Гусева Р.И. Современные стапельные системы в авиастроении // Авиационная промышленность. – 2022. – №4. – С. 27–33.
3. ГОСТ 2.108-68. Единая система конструкторской документации. Спецификация. – М.: Стандартиформ, 2018.
4. ГОСТ Р 70362-2022. Бетоны тяжелые. Технические условия. – М.: Российский институт стандартизации, 2022.
5. Стратегия развития авиационной промышленности Российской Федерации до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 25.12.2022 № 4132-р).

UDC 004.056.53

Petriankin A.V., Grodzenskiy Ya.S. Identity provider as a single point of compromise in zero trust network access architectures

Провайдер идентификационных данных как единая точка компрометации в архитектурах доступа с нулевым доверием

Petriankin A.V.,

Master Student, Institute of Cyber Intelligence Systems,
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

Grodzenskiy Ya.S.,

Candidate of technical sciences, Associate professor,
Institute of Cyber Intelligence Systems, National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia

Петрянкин Алексей Владимирович,
магистрант, Институт интеллектуальных кибернетических систем, Национальный
исследовательский ядерный университет «МИФИ» Россия, г. Москва

Гродзенский Яков Сергеевич,
кандидат технических наук,

Доцент кафедры «Криптология и кибербезопасность»
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, г. Москва

Abstract. *Relevance. Zero Trust Network Access architectures reduce the network exposure of protected services, but move the center of trust to the identity infrastructure. An identity provider authenticates subjects, issues access tokens, transfers attribute assertions, and integrates with access policies. Its compromise, including administrative accounts, signing keys, or federated connections, can therefore affect many relying services. Objective. To develop an attack-surface model for an identity provider in ZTNA and classify the main compromise vectors of the identity plane. Methods. The study uses the NIST SP 800-207 architecture, set-theoretic attack-surface modeling, analysis of SAML 2.0, OpenID Connect and OAuth 2.0, and publicly described identity incidents and techniques. Results. The identity-plane attack surface is defined as a component of the ZTNA control-plane attack surface. The model distinguishes compromise of a user session, a signing key, administrative access, and federated trust. It shows that ZTNA reduces network exposure in normal operation, whereas IdP compromise produces a trust-concentration effect whose impact depends on the number and criticality of relying services. Scientific novelty. The novelty lies in modeling the IdP not merely as an authentication component but as an independent attack-surface object within the ZTNA control plane. Unlike approaches that focus primarily on network reachability in the data plane, the proposed model accounts for trust-violation scenarios: compromise of a user session, theft of signing keys, compromise of an IdP administrator, and breach of federated trust relationships. This makes it possible to quantify risk concentration in the identity infrastructure and compare architectures not only by the number of active network sessions but also by the amount of trust delegated to the identity provider.*

Keywords and phrases: zero trust network access, ZTNA, identity provider, IdP, attack surface, identity plane, trust concentration, SAML, OpenID Connect, multi-factor authentication bypass.

Аннотация. Архитектуры доступа с нулевым доверием (Zero Trust Network Access, ZTNA) уменьшают сетевую экспонированность защищаемых сервисов: пользователь получает доступ не к внутреннему сегменту сети, а к конкретному приложению или ресурсу. Однако при этом центр доверия переносится с сетевого периметра на инфраструктуру идентификации. Провайдер идентификационных данных (Identity Provider, IdP) становится узлом, через который проходят аутентификация, выпуск маркеров доступа, передача атрибутивных утверждений и интеграция с политиками доступа. Поэтому компрометация IdP, его административных учетных записей, ключей подписи или федеративных связей способна затронуть сразу множество сервисов, доверяющих его утверждениям. Цель: разработка модели оценки поверхности атаки провайдера идентификационных данных в

ZTNA-архитектурах и классификация основных векторов компрометации плоскости идентификации. Методы. Используются архитектурный анализ модели Zero Trust по NIST SP 800-207, теоретико-множественное моделирование поверхности атаки, анализ протоколов и стандартов SAML 2.0, OpenID Connect и OAuth 2.0, а также обобщение публично описанных инцидентов и техник атак на инфраструктуру идентификации. Результаты: введено понятие поверхности атаки плоскости идентификации как частной составляющей поверхности атаки плоскости управления ZTNA. Предложена сценарная модель экспонированности IdP, различающая компрометацию пользовательской сессии, ключа подписи, административного доступа и федеративного доверия. Показано, что в штатном режиме ZTNA может сокращать сетевую экспонированность сервисов, но при компрометации IdP возникает эффект концентрации доверия, при котором масштаб последствий определяется числом сервисов, доверяющих данному провайдеру идентификационных данных. Научная новизна и элемент авторского вклада состоят в том, что IdP рассматривается не только как компонент аутентификации, а как самостоятельный объект моделирования поверхности атаки плоскости управления ZTNA. В отличие от подходов, оценивающих преимущественно сетевую достижимость сервисов в плоскости передачи данных, предложенная модель учитывает сценарии нарушения доверия: захват пользовательской сессии, кражу ключей подписи, компрометацию администратора IdP и нарушение федеративных связей. Это позволяет количественно описывать концентрацию риска в инфраструктуре идентификации и сопоставлять архитектуры не только по числу активных сетевых сессий, но и по объему доверия, делегированного IdP.

Ключевые слова: доступ с нулевым доверием, ZTNA, провайдер идентификационных данных, IdP, поверхность атаки, плоскость идентификации, единая точка компрометации, SAML, OpenID Connect, обход многофакторной аутентификации.

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

Развитие распределенных информационных систем привело к тому, что традиционная модель защищенного сетевого периметра перестала соответствовать практике эксплуатации корпоративных ресурсов. Пользователи, устройства и приложения находятся в разных сетях, облачных средах и организационных контурах. В этих условиях архитектуры доступа с нулевым доверием предлагают иной подход: доступ предоставляется не к сети в целом, а к конкретному ресурсу на основании идентичности субъекта, состояния устройства, контекста запроса и действующей политики безопасности. [1]

В стандарте NIST SP 800-207 выделяются логические компоненты архитектуры Zero Trust: модуль принятия решений о доступе, администратор политик и точка применения политик. На практике эти компоненты тесно связаны с системой управления идентификацией и доступом, центральным элементом которой становится провайдер идентификационных данных. Он подтверждает личность пользователя или сервиса, выдает маркеры доступа, передает атрибутные утверждения о группах и ролях и участвует в оценке риска сессии. [2]

Такое смещение повышает управляемость доступа, но формирует новое архитектурное противоречие. С одной стороны, ZTNA уменьшает сетевую поверхность атаки: сервисы становятся недоступны без авторизации, а пользователь не получает

широкую связность с внутренним сегментом. С другой стороны, множество доверяющих сервисов начинают принимать решения на основании утверждений одного IdP. Если нарушитель получает возможность выпускать действительные маркеры доступа, изменять политики, управлять многофакторной аутентификацией или подменять федеративные отношения, компрометация распространяется уже не через сеть, а через доверие.

Поэтому для оценки безопасности ZTNA недостаточно анализировать только плоскость передачи данных. Необходимо отдельно рассматривать плоскость управления и, внутри нее, плоскость идентификации. Настоящая статья направлена на формализацию этого аспекта: провайдер идентификационных данных рассматривается как потенциальная точка концентрации компрометационного риска, а не только как вспомогательный сервис аутентификации. В существующих работах по Zero Trust основное внимание уделяется принципам непрерывной проверки доступа, микросегментации и снижению сетевой достижимости сервисов. Отдельные исследования поверхности атаки описывают общие метрики экспонированности, а материалы по SAML, OpenID Connect и OAuth 2.0 фиксируют конкретные техники атак на инфраструктуру идентификации. Вместе с тем недостаточно явно рассматривается провайдер идентификационных данных как самостоятельный объект концентрации доверия в плоскости управления ZTNA. Именно этот аспект рассматривается в настоящей работе.

В типовой ZTNA-системе IdP участвует в следующих процессах: аутентификация субъекта: подтверждение личности пользователя, устройства, сервисной учетной записи или программного компонента; формирование атрибутивных утверждений: передача сведений о ролях, группах, контексте, состоянии устройства, факте прохождения многофакторной аутентификации и уровне риска; выдача маркеров доступа: формирование SAML-утверждений, маркеров доступа, маркеров обновления и иных артефактов, используемых доверяющими сервисами; интеграция с политиками доступа: передача атрибутов в модуль принятия решений для разрешения или запрета конкретной сессии; федерация доверия: взаимодействие с внешними провайдерами идентификационных данных, партнерами, облачными платформами и прикладными сервисами.

Наиболее распространенными механизмами взаимодействия являются SAML 2.0, OpenID Connect и OAuth 2.0. При этом SAML 2.0 и OpenID Connect используются для передачи утверждений об аутентификации и идентичности, тогда как OAuth 2.0 является протоколом авторизации и применяется для выдачи и использования маркеров доступа. В SAML-модели IdP подписывает утверждение, которое принимает доверяющий сервис.

В модели OpenID Connect, построенной поверх OAuth 2.0, провайдер идентификационных данных или сервер авторизации выдает подписанные маркеры, содержащие набор атрибутов. В обоих случаях сервис принимает решение не на основании самостоятельной повторной проверки пользователя, а на основании доверия к IdP и его криптографическим ключам. [3, 4]

Критическим свойством такой модели является асимметрия доверия. Доверяющий сервис, как правило, не выполняет независимую повторную проверку субъекта, а принимает утверждение IdP. Следовательно, компрометация IdP, его ключей подписи или административной конфигурации может приводить к выпуску действительных для сервисов артефактов доступа.

Термин «единая точка отказа» описывает компонент, отказ которого приводит к нарушению работы всей системы. Для провайдера идентификационных данных в ZTNA более точным является термин «потенциальная точка концентрации компрометационного риска». Под ним в настоящей работе понимается компонент, нарушение доверия к которому при определенных условиях централизации создает возможность несанкционированного доступа к множеству зависимых сервисов. [5, 6]

IdP может становиться потенциальной точкой концентрации компрометационного риска по следующим причинам: множество доверяющих сервисов принимают утверждения одного источника идентификационных данных; административные действия в IdP могут менять доступ сразу к нескольким приложениям; компрометация ключей подписи позволяет формировать криптографически действительные маркеры или SAML-утверждения; отзыв доверия к IdP в рабочем режиме затруднен, поскольку приводит к нарушению доступа пользователей к критичным сервисам; федеративные связи расширяют границы доверия за пределы одной организации.

Важно подчеркнуть, что этот вывод не отрицает преимуществ ZTNA. Архитектура ZTNA действительно может уменьшать поверхность атаки в плоскости передачи данных. Однако выигрыш в плоскости передачи данных сопровождается ростом значимости IdP как компонента плоскости управления. Следовательно, корректная оценка безопасности должна учитывать обе составляющие.

Полную поверхность атаки ZTNA-системы целесообразно представить как сумму трех компонент:

$$AS_{total}(t) = AS_{data}(t) + AS_{control}(t) + AS_{endpoint}(t) \quad (1)$$

где $AS_{data}(t)$ — экспонированность плоскости передачи данных; $AS_{control}(t)$ — экспонированность плоскости управления, включая IdP, контроллер политик, каналы

доставки решений и механизмы отзыва; $AS_{endpoint}(t)$ — уязвимость конечных устройств, агентов и локальных хранилищ ключей.

Предметом настоящей статьи является частная компонента:

$$AS_{idp}(t) \subset AS_{control}(t)$$

то есть поверхность атаки плоскости идентификации.

Пусть U — множество пользователей и сервисных субъектов; S — множество сервисов, доверяющих IdP; A — множество административных учетных записей IdP; F — множество федеративных связей; K — множество ключей подписи и криптографических секретов IdP; w_s — вес сервиса s , отражающий его критичность и объем предоставляемого доступа. Через $K_t \subseteq U \times S$ обозначим множество активных направлений доступа в момент времени t , то есть множество пар «субъект — сервис», для которых существует хотя бы одна действующая сессия или действительный маркер доступа. Если между одним субъектом и одним сервисом одновременно существует несколько технических сессий, в базовой модели они агрегируются в одну пару (u, s) , поскольку оценивается не число соединений, а охват доверия и достижимость сервиса.

Для сценария компрометации пользовательской учетной записи или сессии поверхность атаки можно определить следующим образом:

$$AS_{cred}^{idp}(t) = \sum_{(u,s) \in K_t} w_s \cdot m_u \cdot e_s \quad (2)$$

где m_u — коэффициент уязвимости аутентификации пользователя u , а e_s — коэффициент окна эксплуатации маркера доступа для сервиса s . Значение m_u снижается при использовании устойчивой к фишингу многофакторной аутентификации, привязки к устройству и проверки состояния конечной точки. Значение e_s снижается при коротком сроке действия маркеров, наличии механизма отзыва и непрерывной оценке доступа. [7, 8]

Компрометация IdP не всегда ограничивается активными сессиями. Для сценария кражи ключа подписи SAML или OpenID Connect поверхность атаки определяется уже не текущими сессиями, а всем множеством сервисов, доверяющих данному ключу: [9]

$$AS_{key}^{idp} = \chi_{key} \sum_{s \in S_{key}} w_s \quad (3)$$

где χ_{key} — индикатор компрометации ключа, а S_{key} — множество сервисов, принимающих маркеры или SAML-утверждения, подписанные этим ключом. При $\chi_{key} = 1$ нарушитель получает возможность формировать действительные артефакты доступа в обход обычного процесса аутентификации.

Для сценария компрометации административной учетной записи предлагается выражение:

$$AS_{admin}^{idp} = \sum_{a \in A_{comp}} \sum_{s \in S(a)} w_s \quad (4)$$

где A_{comp} — множество скомпрометированных администраторов, а $S(a)$ — множество сервисов, на которые администратор может влиять через изменение политик, групп, факторов аутентификации, приложений или доверенных сертификатов.

Для сценария компрометации федеративного партнера:

$$AS_{fed}^{idp} = \sum_{f \in F_{comp}} \sum_{s \in S(f)} w_s \quad (5)$$

где F_{comp} — множество нарушенных федеративных связей, а $S(f)$ — сервисы, принимающие утверждения через данную федерацию.

Обобщенный коэффициент концентрации доверия IdP может быть представлен как:

$$ICF = \max(AS_{cred}^{idp}, AS_{key}^{idp}, AS_{admin}^{idp}, AS_{fed}^{idp}) \quad (6)$$

Использование максимума отражает сценарную, а не вероятностную природу показателя. В рамках одного расчетного сценария выбирается доминирующий способ первичной компрометации: пользовательская сессия, ключ подписи, административный доступ или федеративное доверие. Суммирование этих компонент в базовой модели не применяется, поскольку один и тот же сервис может попадать сразу в несколько множеств достижимости, что приведет к двойному счету. Для анализа сложного инцидента, в котором несколько сценариев реализуются последовательно или совместно, может быть введен отдельный комбинированный сценарий либо взвешенная сумма компонент; такая вероятностная оценка выходит за рамки настоящей статьи.

Предложенная модель не является вероятностной оценкой риска. Она не отвечает на вопрос, насколько вероятна компрометация. Ее назначение — определить потенциальный охват компрометации при реализации конкретного сценария и тем самым количественно описать концентрацию доверия в IdP.

Для демонстрации работоспособности модели рассмотрим условную организацию, в которой через один IdP доступны четыре сервиса: корпоративная почта s_1 с весом $w_{s_1} = 3$, репозиторий исходного кода s_2 с весом $w_{s_2} = 5$, система непрерывной интеграции s_3 с весом $w_{s_3} = 4$ и кадровая система s_4 с весом $w_{s_4} = 2$. Вес задается экспертно по шкале от 1 до 5, где 1 соответствует низкой критичности, а 5 — сервису, компрометация которого дает значимый ущерб или возможность дальнейшего развития атаки.

Пусть пользователь u_1 имеет активные направления доступа только к почте и репозиторию. Для него используется устойчивая к фишингу многофакторная аутентификация и проверка устройства, поэтому принимаем $m_{u_1} = 0,2$. Для почты срок

действия маркера и механизм отзыва дают $e_{s_1} = 0,2$, для репозитория — $e_{s_2} = 0,3$. Тогда пользовательский сценарий дает:

$$AS_{cred}^{idp}(t) = 3 \cdot 0,2 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 \cdot 0,3 = 0,42.$$

Если же скомпрометирован ключ подписи, которому доверяют все четыре сервиса, то охват определяется не активными сессиями, а всем множеством доверяющих сервисов:

$$AS_{key}^{idp} = 3 + 5 + 4 + 2 = 14.$$

Если скомпрометирован оператор службы поддержки, способный управлять доступом только к почте и кадровой системе, то:

$$AS_{admin}^{idp} = 3 + 2 = 5.$$

Таблица 1

Связь сценариев компрометации с мерами защиты

Сценарий	Что расширяет охват	Что снижает охват	Практический контроль
Компрометация сессии	Длительные маркеры, отсутствие отзыва, слабая MFA	Короткие токены, отзыв, проверка устройства	Phishing-resistant MFA, CAE/отзыв, device binding
Кража ключа подписи	Один ключ для множества сервисов, экспортируемые ключи	Разделение ключей, HSM/KMS, ротация	Невыгружаемые ключи, журналирование подписи, emergency rotation
Компрометация администратора	Широкие права IdP-админов, общая учётная запись	JIT/JEA-доступ, разделение контуров	PAM, отдельные admin accounts, approval workflow
Компрометация федерации	Неограниченные federation trust и OAuth consent	Срок действия, scoped claims, периодический пересмотр	Реестр federation trust, владельцы, review, журналирование consent

В рассматриваемом примере $ICF = \max(0,42; 14; 5; 0) = 14$, то есть доминирующим сценарием является компрометация ключа подписи. Пример показывает, что усиление пользовательской аутентификации снижает компоненту $AS_{cred}^{idp}(t)$, но не устраняет необходимость защиты криптографических ключей и административной плоскости IdP.

Значение $AS_{fed}^{idp} = 0$, поскольку в рассматриваемом примере федеративные связи не заданы.

Научная новизна состоит в следующем.

Во-первых, поверхность атаки ZTNA-архитектуры разделена на плоскость передачи данных, плоскость управления и плоскость конечных устройств, при этом плоскость идентификации выделена как самостоятельная часть плоскости управления.

Во-вторых, для IdP предложена сценарная модель экспонированности, которая различает четыре типа компрометации: пользовательскую, криптографическую, административную и федеративную. Такое разделение позволяет показать, что разные атаки имеют разный радиус действия: от одной активной сессии до полного множества сервисов, доверяющих IdP.

В-третьих, введен коэффициент концентрации доверия, позволяющий количественно описывать зависимость масштаба последствий от числа доверяющих сервисов, объема административных полномочий и количества федеративных связей.

Векторы атак на IdP целесообразно разделить на пять классов.

Таблица 2

Классификация векторов компрометации IdP

Класс атак	Примеры	Механизм	Последствия
Компрометация пользователя	подбор паролей, использование утекших паролей, фишинг, утомление запросами МФА	получение пароля, сессии или подтверждения второго фактора	доступ к сервисам в рамках прав пользователя
Компрометация сессии	атака «злоумышленник посередине», кража файлов сеанса, кража маркера обновления	перехват уже аутентифицированной сессии	обход МФА после успешной аутентификации
Компрометация криптографического доверия	кража ключа подписи, подмена сертификата подписи, атака Golden SAML	выпуск действительных утверждений или маркеров	имитация пользователей для всех доверяющих сервисов
Компрометация администрирования	захват учетной записи администратора, злоупотребление службой поддержки, сброс МФА	управление политиками и учетными записями	повышение привилегий, отключение защитных механизмов
Компрометация федерации и интеграций	подмена внешнего IdP, злоупотребление согласием приложения OAuth, злоупотребление SCIM/API	нарушение доверенных связей между доменами	распространение компрометации между организациями и сервисами

К первому классу относятся атаки на первичную аутентификацию: подбор паролей, использование утекших учетных данных, фишинг и социальная инженерия. Такие атаки обычно ограничены правами конкретного пользователя, но при компрометации привилегированной учетной записи их эффект становится системным. [10]

Ко второму классу относятся атаки на сессионные артефакты. Особенность этих атак состоит в том, что многофакторная аутентификация может быть уже успешно пройдена пользователем, а нарушитель получает не пароль, а действительную сессию

или маркер доступа. Это снижает эффективность традиционных способов МФА, не защищенных от фишинга и перехвата сессии. [11]

Третий класс является наиболее опасным с архитектурной точки зрения. При компрометации ключей подписи нарушитель может формировать маркеры или SAML-утверждения, которые доверяющий сервис воспринимает как легитимные. В этом случае атака выходит за пределы одной пользовательской сессии. [12]

Четвертый класс связан с административной плоскостью IdP. Нарушитель, получивший права администратора, может добавлять приложения, изменять группы, сбрасывать факторы аутентификации, создавать резервные учетные записи, менять политики доступа и регистрировать новые ключи. Такие действия часто выглядят как штатная административная активность и требуют отдельного контроля. [13]

Пятый класс относится к федеративным связям и интеграциям. Чем больше внешних IdP, прикладных сервисов, коннекторов синхронизации, OAuth-приложений и сервисных учетных записей подключено к IdP, тем шире область возможного распространения компрометации.

В классической VPN-архитектуре точкой концентрации риска является VPN-шлюз. Его компрометация открывает нарушителю сетевую достижимость внутренних ресурсов. В ZTNA сетевой доступ ограничивается, но роль точки концентрации риска переносится в плоскость идентификации.

Таблица 3

Сравнение VPN-шлюза и IdP как точек концентрации риска

Характеристика	VPN-шлюз	IdP в ZTNA
Плоскость архитектуры	плоскость передачи данных	плоскость управления и идентификации
Основной объект доверия	сетевой туннель	маркер доступа, утверждение, атрибут
Последствие компрометации	доступ к сетевому сегменту	доступ к сервисам, доверяющим IdP
Типовое развитие атаки	горизонтальное перемещение по сети	изменение ролей, групп, приложений и маркеров
Ключевой риск	широкая сетевая достижимость	концентрация доверия и ключей
Основные меры снижения	микросегментация, списки доступа, переход к ZTNA	сегментация IdP, защита ключей, МФА, управление привилегиями, мониторинг маркеров

Это сравнение показывает, что переход от VPN к ZTNA не устраняет проблему концентрации компрометационного риска автоматически. Он изменяет ее природу: вместо сетевого шлюза критическим объектом становится провайдер идентификационных данных и связанная с ним инфраструктура доверия.

Снижение риска компрометации IdP должно строиться не только на усилении аутентификации пользователей, но и на уменьшении концентрации доверия.

Сегментация доверия IdP. Критичные сервисы не должны безусловно доверять тому же IdP и тем же политикам, что и массовые корпоративные приложения. Для административных, финансовых и технологических систем целесообразно использовать отдельные зоны доверия, отдельные политики или дополнительный независимый фактор подтверждения.

Разделение пользовательского и административного контуров. Административный доступ к IdP должен быть отделен от обычного доступа единого входа. Администратор IdP не должен использовать одну и ту же учетную запись для повседневной работы и для управления политиками.

Минимизация федеративных связей. Каждая федеративная связь должна иметь владельца, срок действия, документированную цель, ограниченную область действия и процедуру регулярного пересмотра.

Ограничение согласий приложений и интеграций. Регистрация приложений, выдача согласия OAuth и создание сервисных учетных записей должны проходить через утверждение и журналироваться как привилегированные операции.

Хранение ключей подписи в аппаратном модуле или сервисе управления ключами. Ключи SAML и OpenID Connect должны быть неэкспортируемыми, а операции подписи — журналируемыми.

Регулярная ротация ключей и сертификатов. Ротация должна выполняться планоно и внепланово после инцидентов, связанных с подозрением на компрометацию.

Короткий срок действия маркеров доступа. Маркер доступа должен иметь минимально допустимый срок действия, а маркер обновления — привязку к устройству, контексту и политике риска.

Поддержка механизма отзыва. Доверяющие сервисы должны учитывать отзыв маркеров, изменение риска и отключение пользователя без ожидания полного истечения срока действия маркера.

Устойчивая к фишингу многофакторная аутентификация. Для администраторов и пользователей критичных систем следует применять аппаратные ключи, WebAuthn или сертификатную аутентификацию. Подтверждения через уведомления и одноразовые коды менее устойчивы к социальной инженерии и перехвату сессии.

Управление привилегированным доступом. Административные сессии должны быть временными, подтверждаемыми, журналируемыми и ограниченными по принципу доступа «точно в срок».

Аварийные учетные записи. Резервные учетные записи должны существовать, но храниться отдельно, использовать аппаратные факторы и регулярно проверяться. Их применение должно сопровождаться немедленным уведомлением службы безопасности.

Ограничение операций службы поддержки. Сброс МФА, смена номера телефона, восстановление доступа и изменение факторов аутентификации должны считаться высокорисковыми операциями.

Для IdP необходимо выделить отдельный набор признаков возможной компрометации: массовая выдача маркеров без соответствующих событий интерактивного входа; входы администраторов с нетипичных устройств, сетей и географий; изменение SAML- или OpenID Connect-конфигурации, сертификатов и адресов перенаправления; регистрация новых OAuth-приложений с широкими правами; рост числа запросов МФА к одному пользователю; успешная аутентификация после серии отказов МФА; массовый экспорт пользователей, групп или конфигураций через API; изменение коннекторов синхронизации и сервисных учетных записей; появление маркеров с нетипичным сроком действия или набором атрибутов.

Реагирование на компрометацию IdP должно включать не только блокировку пользователя, но и ротацию ключей, отзыв маркеров, проверку приложений, анализ федеративных связей и пересмотр административных действий за период возможного присутствия нарушителя.

Предложенная модель оценивает потенциальный охват компрометации, но не вычисляет вероятность реализации атаки. Для полноценной оценки риска необходимо дополнить ее вероятностными параметрами: частотой атак, зрелостью центра мониторинга безопасности, уровнем защищенности IdP, качеством журналирования, временем обнаружения и временем реагирования.

Кроме того, веса w_s , коэффициенты m_u и e_s требуют калибровки под конкретную организацию. Пример показывает возможный способ экспертного задания шкал, однако для промышленного применения модель необходимо настраивать по данным конкретной инфраструктуры: критичности сервисов, срокам действия маркеров, фактическим правам администраторов и числу доверяющих приложений.

Модель также не учитывает уязвимости кода конкретного IdP, ошибки реализации протоколов и внутренние угрозы со стороны легитимных администраторов. Эти аспекты должны рассматриваться в рамках отдельной модели угроз.

Переход от VPN к ZTNA снижает сетевую поверхность атаки, но не устраняет проблему концентрации риска. В ZTNA эта концентрация переносится из плоскости передачи данных в плоскость идентификации. Провайдер идентификационных данных

становится не просто сервисом аутентификации, а центральным элементом доверия, от которого зависит доступ к множеству приложений и сервисов. При этом настоящая работа не противопоставляет себя архитектуре ZTNA, а уточняет условия безопасного внедрения: снижение сетевой экспонированности должно сопровождаться защитой инфраструктуры идентификации.

Основные результаты работы состоят в следующем. Во-первых, выделена плоскость идентификации как самостоятельная составляющая плоскости управления ZTNA. Во-вторых, предложена сценарная модель, позволяющая отдельно оценивать компрометацию пользовательской сессии, ключа подписи, административного доступа и федеративного доверия. Показано, что наиболее опасные сценарии связаны не с захватом отдельной учетной записи, а с нарушением криптографического или административного доверия к IdP. В-третьих, введен коэффициент концентрации доверия ICF, позволяющий количественно сопоставлять различные сценарии по потенциальному охвату доверяющих сервисов.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенная модель позволяет обосновывать меры защиты IdP через уменьшение конкретных компонент компрометационного охвата: сокращение числа сервисов, доверяющих одному IdP; разделение административного и пользовательского контуров; защиту ключей подписи; ограничение федеративных связей; сокращение срока действия маркеров; применение устойчивой к фишингу многофакторной аутентификации.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на эмпирическую калибровку коэффициентов модели по журналам IdP, средствам мониторинга и контроллерам ZTNA, а также на разработку методики автоматизированного расчета экспонированности IdP для корпоративных инфраструктур.

References

1. Syed N. F., Shah S. W., Shaghaghi A., Anwar A., Baig Z., Doss R. Zero Trust Architecture (ZTA): a comprehensive survey // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 57143–57179. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3174679.
2. Zero Trust Architecture : NIST Special Publication 800-207 / Rose S., Borchert O., Mitchell S., Connelly S. National Institute of Standards and Technology, 2020. DOI: 10.6028/NIST.SP.800-207.
3. Assertions and protocols for the OASIS Security Assertion Markup Language (SAML) V2.0 : OASIS Standard / Cantor S., Kemp J., Philpott R., Maler E. OASIS, March 2005. URL: <http://docs.oasis-open.org/security/saml/v2.0/saml-core-2.0-os.pdf> (дата обращения: 07.05.2026).

4. OpenID Connect Core 1.0 incorporating errata set 2 / Sakimura N., Bradley J., Jones M., de Medeiros B., Mortimore C. OpenID Foundation, December 2023. URL: https://openid.net/specs/openid-connect-core-1_0.html (дата обращения: 10.05.2026).
5. Howard M., Pincus J., Wing J. M. Measuring relative attack surfaces / Lee D. T., Shieh S. P., Tygar J. D. (eds.) // Computer Security in the 21st Century. Boston : Springer, 2005. P. 109–137. DOI: 10.1007/0-387-24006-3_8.
6. Manadhata P. K., Wing J. M. An attack surface metric // IEEE Transactions on Software Engineering. 2011. Vol. 37, no. 3. P. 371–386.
7. Digital Identity Guidelines: Authentication and Authenticator Management : NIST Special Publication 800-63B-4 / Temoshok D., Fenton J. L., Choong Y.-Y., Lefkowitz N., Regenscheid A., Galluzzo R., Richer J. National Institute of Standards and Technology, 2025. DOI: 10.6028/NIST.SP.800-63B-4.
8. Multi-Factor Authentication Request Generation : Technique T1621 // MITRE ATT&CK. URL: <https://attack.mitre.org/techniques/T1621/> (дата обращения: 16.05.2026).
9. Reiner S. Golden SAML: newly discovered attack technique forges authentication to cloud apps / CyberArk Labs, 2017. URL: <https://www.cyberark.com/resources/threat-research-blog/golden-saml-newly-discovered-attack-technique-forges-authentication-to-cloud-apps> (дата обращения: 16.05.2026).
10. Forge Web Credentials: SAML Tokens : Technique T1606.002 // MITRE ATT&CK. URL: <https://attack.mitre.org/techniques/T1606/002/> (дата обращения: 17.05.2026).
11. Adversary-in-the-Middle : Technique T1557 // MITRE ATT&CK. URL: <https://attack.mitre.org/techniques/T1557/> (дата обращения: 20.05.2026).
12. Microsoft mitigates China-based threat actor Storm-0558 targeting of customer email / Microsoft Security Response Center. Microsoft, 2023. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/msrc/blog/2023/07/microsoft-mitigates-china-based-threat-actor-storm-0558-targeting-of-customer-email> (дата обращения: 21.05.2026).
13. Implementing Phishing-Resistant MFA / CISA. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, 2022. URL: <https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/fact-sheet-implementing-phishing-resistant-mfa-508c.pdf> (дата обращения: 25.05.2026).

TRANSPORT AND MOBILITY

UDC 625.745.2: 691.328

Khalikov R.M., Nedoseko A.I., Pavlov S.Y., Glazachev A.O. **Targeted increase in the impact resistance of concrete in the** **construction of culvert transport structures**

Khalikov Rauf Muzagitovich,

PhD in Chemistry, Associate Professor of the Department of
"Highways, Bridges and Transport Structures",
"Ufa State Petroleum Technological University", Russia, Ufa;

Nedoseko Andrey Igorevich,

postgraduate of the Department "Highways, Bridges and Transport Structures",
"Ufa State Petroleum Technological University", Russia, Ufa;

Pavlov Stanislav Yuryevich,

PhD in Law, Associate Professor of the Department of "Financial and Administrative Law",
"Ufa University of Science and Technology", Russia, Ufa;

Glazachev Anton Olegovich,

PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of
"Highways, Bridges and Transport Structures",
"Ufa State Petroleum Technological University", Russia, Ufa

Abstract. *The successful implementation of the national project "Infrastructure for Life" in Russia provides for a significant acceleration of the construction of highways and road transport facilities. Therefore, the innovative search for a directional increase in the impact resistance of concrete for transport purposes remains relevant. This article is aimed at considering technological approaches to increase the operational durability of concrete culvert transport structures. The functional purpose of culverts is the optimal passage of small watercourses that occur during heavy rains and intense snowmelt. Culverts for road transport purposes must meet the operational requirements of strength, reliability of water flow passage, resistance to damage and durability. One of the effective ways to increase the impact resistance of hydraulic engineering concrete transport composites is the modification of various types of dispersed reinforcement: basalt, polymer, steel fibers. The targeted introduction of steel fiber into the concrete composition (with a diameter of 0.3 to 1.0 mm) with an optimal percentage of volumetric reinforcement of 1.5% after hardening of the fiber concrete increases the tensile strength by 120-150%. Calculations of culverts of transport infrastructure using a directional increase in the impact resistance of steel fiber reinforced concrete were performed for two load variants (symmetrical temporary load application and asymmetric) and for two embankment heights above the structure (1 and 4 meters). Culverts of highways using steel-fiber reinforced concrete have increased crack resistance, water resistance, impact resistance, and tensile strength up to 30 MPa.*

Keywords: *transport infrastructure, culvert, fibro concrete.*

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

Currently, the implementation of the national project "Infrastructure for Life" of the Russian Federation provides for a significant increase in the volume of construction of highways and road transport facilities. One of the most massive engineering structures of the transport infrastructure are culverts [1] of various designs (metal, reinforced concrete pipes of

round or rectangular cross-sections, small arched filling bridges, etc.), which are designed for continuous or short-term passage of water masses. Under intense dynamic influences (pulse loads, etc.), areas of intense tensile stresses begin to form in reinforced concrete culverts, which can lead to the destruction of transport structures. Therefore, an alternative search for a targeted increase in the impact resistance of concrete for road transport purposes remains relevant.

The purpose of this article is to consider rational approaches to increase the operational durability of concrete transport culverts.

The transport infrastructure of the highway includes not only a structural roadway, but also a complex of engineering structures, elements of arrangement and roadside service [2, 3]. Hydraulic engineering structures on highways are most often culverts (Figure 1) in single or multi-row design, as well as filling arched bridge structures in reinforced concrete or steel execution.



Figure 1. Culvert structure of the highway

According to GOST 32871-2014 "Public roads. Culvert road pipes. Technical requirements" a culvert is an artificial structure designed to allow small permanent or intermittent watercourses to pass under road embankments. To eliminate the accumulation of water near the embankment of the highway and its erosion, pressure-free culverts with a diameter of up to 2 meters are mainly designed and created. The functional purpose of culverts

in Russia is the timely passage of small watercourses that occur periodically (during heavy rains, heavy snowmelt, etc.).

Hundreds of thousands of culverts are currently used on the highways of the Russian Federation and Bashkortostan, which vary in construction materials, hole size and cross-section shape, type of heads, slope and other design features. Culverts under embankments on highways account for about half of all artificial structures. Hydraulic engineering culverts [4] of the transport infrastructure are operated under conditions of alternating drying, cyclic freezing and thawing, and the abrasive effect of water flow. Therefore, culverts must functionally meet the operational requirements of strength; reliability and safety of water flow passage; resistance to damage; fire resistance; cost-effectiveness; environmental friendliness and durability.

Hydraulic culverts of highways consist of pipe links and heads. The pipe links can be circular or rectangular in cross-section, supported on reinforced concrete slabs or shaped blocks for round pipes. At the entrance and exit from the pipe, the heads are arranged, which smoothly introduce the flow of water into the pipe and output, as well as reduce the risk of erosion of the embankment and riverbed. The design of the heads consists of a portal wall and two sloping wings, sunk into the ground and mounted on a 10 cm thick crushed stone base. The type of foundation is selected during the design process depending on the local engineering and geological conditions, the groundwater level, the hydrological mode of operation of the culvert, and the availability of building materials.

It should be noted that in order to avoid dangerous filtration, liquefaction and removal of soil from the embankment of the highway, water should not be allowed to seep out of the culvert. One of the most effective ways to increase the impact resistance and durability of hydraulic concrete composites for road transport purposes is the modification of various types of dispersed reinforcement: basalt, polymer, steel fibers [5, 6]. Fiber components interact with a three-dimensional network of calcium-silicate-hydrate binder Portland cement, contribute to reducing porosity and compaction of the cement stone structure, and increase shear stresses of the adhesive bond of the matrix. The targeted introduction of the appropriate complementary fiber into the structure of hydraulic engineering concretes makes it possible to significantly reduce shrinkage cracking and increase bending strength.

Also be noted that the combination of fiber reinforcement with hydrophobization of high-strength concrete is of particular importance for hydraulic culverts. Hydrophobic additives can reduce water absorption, capillary suction and permeability of concrete composites for road transport purposes. Rectangular culverts, due to their large capacity of water volumes, are used under embankments up to 20 m high on both intermittent and small permanent watercourses. If necessary, rectangular culverts functionally serve for convenient

bio-crossings of domestic or wild animals on their natural migration routes [7, 8].

In the practice of road transport construction, rectangular pipes consisting of blocks are used to increase the impact resistance of fiber-reinforced concrete along with solid block sections with holes of 2.0 m; 2.5 m; 3.0 m; 4.0 m, consisting of two wall blocks, a tray block and a floor block, as well as pipes made of slab elements. The main elements of culverts are their body, foundation, inlet and outlet heads (Figure 2).

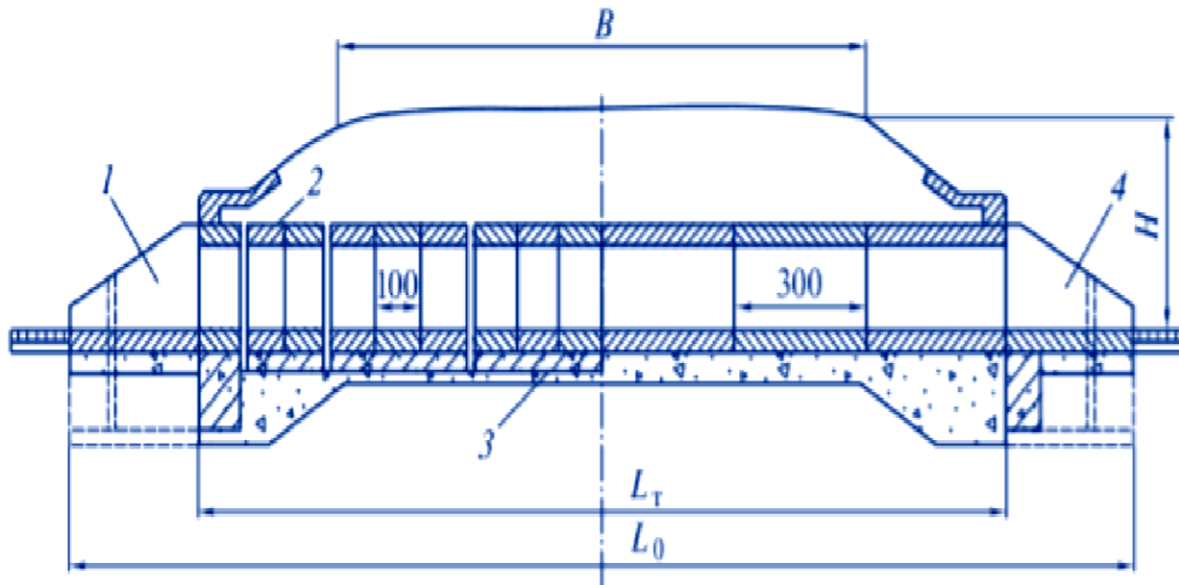


Figure 2. Elements of a culvert on a highway: 1 – inlet head;
 2 – pipe body (links); 3 – foundation; 4 – exit head;
 (B – width of the embankment of the roadbed;
 H – height of the ground floor, L_T – length of the pipe,
 L_0 – total length of the culvert)

To regulate the water flow, ensure smoothness of its flow and prevent longitudinal displacements of elements during embankment landslides, the inlet and outlet sections of culverts are equipped with heads: portal, bell-shaped, etc. Quite promising structural materials for the construction of innovative culvert infrastructure are disperse-reinforced composite fiber-reinforced concrete. To increase the strength characteristics of concrete for road transport purposes, metal, basalt, glass and carbon fiber fibers are added to the composition [9].

Composite fiber concrete is also more resistant to impacts due to its strength and plasticity, which is undoubtedly necessary when operating bridge structures that experience heavy loads and dynamic impacts on a daily basis. The expansion of the use of arched low-span filling bridges made of steel-fiber concrete elements is an innovative direction for

improving the quality of functioning of culverts [10, 11].

Careful research has revealed that the most important physical and mechanical characteristics of fibrocrete are strength, toughness, and the work required to fracture under axial tension and bending. The directional introduction of steel fiber into the concrete mix (with a diameter d_f from 0.3 to 1.0 mm) with an optimal percentage of volumetric reinforcement of 1.5% after hardening of composite fiber concrete is reliably connected to it due to adhesion forces, keyway engagement on the surface or anchors at the ends of the fibers. A comparative analysis of some of the basic physical and mechanical characteristics of traditional concrete and hydraulic fiber-reinforced concrete is given in Table 1.

Table 1

Technological parameters of ordinary concrete and fibro concrete

Values of characteristics	Ordinary concrete	Fibre concrete
Axial tensile strength, MPa	1,5-4,0	9,0-30,0
Compressive strength, MPa	21,0-35,0	35,0-80,0
Shear strength, 10^{-5} MPa	2,0-4,5	4,7-8,5
Coefficient of thermal expansion, 10^{-6} cm/°C	9,9-10,8	8,4-11,0
Impact strength, kg/m	4,8	15,8
Cracking resistance index (according to heat resistance tests)	1	7
Fracture toughness index	1	12-17

The impact resistance in fiber-reinforced concrete of road transport structures is assumed by steel fiber fibers instead of rod reinforcement, which increase its tensile strength by 120-150%. Later, during operation, when exposed to tensile or compressive stresses, fiber and concrete work together, resisting deformations much better than unreinforced concrete. In addition, the targeted use of dispersed reinforcement makes it possible to partially or completely eliminate prestressing and reinforcement work in road construction. Disperse-reinforced road bridge structures using fibre concrete have increased crack resistance, water resistance, impact resistance, and wear resistance, which leads to a significant increase in their durability and operational reliability [12-14].

In the Republic of Bashkortostan, with a large number of small rivers and streams, the need for culverts during the construction and operation of highways is very high. The wider construction and operation of arched fill culverts is effective for the following reasons:

- operating costs are significantly reduced, since arched filling bridges do not have expansion joints or supporting parts;
- due to the relatively small mass of the elements of the culvert bridge, there is no need to use high-capacity cranes;
- the use of arched bridges can significantly reduce the cost of construction and installation work compared to the use of classical girder systems of bridge transport

structures. Since hydraulic structures are built in floodplain areas with weak soil foundations, there is a need to build a pile foundation, not only with vertical, but also with an inclined arrangement of piles, which is difficult for road construction; technological problems also arise with concreting monolithic grillwork.

The culvert structure of the filling arch bridge has a span of 4 m or 5.7 m and consists of two semi-arches that rest on a slab-type foundation block and form a static scheme in the form of a two- or three-hinged arch. This scheme makes the structure immune to possible displacements and subsidence of the supports: the results obtained by calculation make it possible to apply these structures taking into account the temporary load of HK-100 in embankments with a total height of 3.5 to 7 m. The developed cross-section makes it possible to place such bridges on watercourses with a maximum water flow of up to 27 m³/s (with a channel slope of 0.008), as well as to use them as an alternative to girder bridges with a span of 12-15 m.

The optimized use of arched culvert filling bridges using a directional increase in the impact resistance of fiber-reinforced concrete has a number of significant advantages:

- being located in the embankment of the highway, the arch bridge does not disrupt the continuity of the roadbed, does not change traffic conditions, does not require changing the type of roadway, provides an ideal interface of the bridge with the embankments of approaches;
- the operating costs are low compared to girder bridges, there are no expansion joints, transition plates and supporting parts, which significantly affect the comfort of movement and durability of the culvert.;
- the structural elements of the arch bridge have a small mass, so no high-capacity cranes are required for installation.;
- arched culvert bridges of highways are beneficial from the point of view of economic efficiency, as they allow to reduce the cost of construction by almost half.;
- arched bridges fit into the natural landscape, which is also a sought-after trend in innovative construction technologies.

Calculations of culverts of the highway infrastructure using a directional increase in the impact resistance of steel fiber reinforced concrete were performed for two load variants (symmetrical temporary load application and asymmetrical) and for two embankment heights above the structure (1 and 4 meters). The necessary calculations were performed using the software package "PLAXIS" finite element software package, which implements the joint operation of bridge structural elements with the soils of the base and embankment of highways.

To study the stress-strain state of the arch links of fill bridges of culverts of road infrastructure operating as part of a structure under conditions of flat deformation, the "PLAXIS

8.2" software package was used, which makes it possible to simulate the physico-mechanical characteristics of the soils of the base and embankment of arches and to implement the joint operation of reinforced concrete structures under the influence of loads from vehicles and the ground's own weight. In the design calculations of the culvert of the highway, the most unfavorable asymmetric position of the load relative to the span was considered when the load moves within the span of the structure.

The standard running load, reduced to one meter in the width of the bridge from the impact of the HK-100 wheel load:

at a filling height of 1 to 1.9 m

$$p = \frac{40}{(0,8 + h) \cdot 3,8} \quad (1)$$

when the filling height exceeds 1.9 m

$$p = \frac{80}{(3,5 + h) \cdot 3,8} \quad (2)$$

where p – linear load;

h – height of the filling above the arch.

Figure 3 shows the design of the culvert of the highway transport infrastructure – an arched fill bridge, which is a single-span arch with a span of 4.0 m circular shape, made in a double-hinged version. The lifting boom is 2.0 m; the cross-sectional height is assumed to be 250 mm. The calculation of the double-hinged arch with an estimated span of 4 m of the highway culvert was carried out for constant loads of its own weight and embankment $H = 3-7$ m, taking into account the temporary load of HK-100.

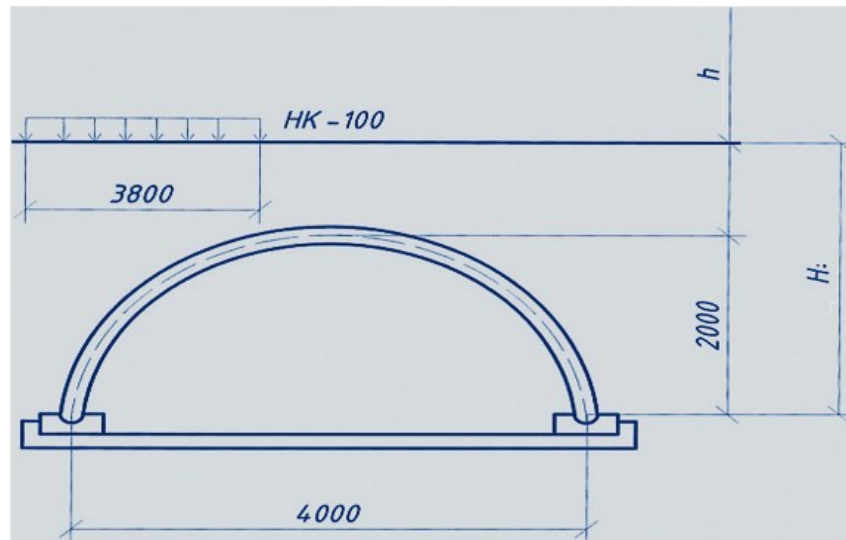


Figure 3. Diagram of the arch of the culvert of the filling bridge of the highway with a span of 4 m

Calculations of the bearing capacity of the foundations of a backfill arch bridge (with a nominal span of 4 m), made for two types of soil conditions (with a sufficiently large depth of fluidplastic clays) have shown that, compared with a standard strip foundation made of precast reinforced concrete slabs, the use of a foundation tightening plate makes it possible to reduce the total draft of the foundation by more than two times, to bring the value closer to the normative indicators. The targeted increase in the impact resistance of steel fiber concrete makes it possible in most cases to abandon the expensive pile foundation with a monolithic grillwork.

The highway's transport infrastructure is not just an asphalt–concrete roadway, but an integrated engineering complex, where each element plays its own irreplaceable role. It should be noted that the technological part of the highway includes: structural elements (roadbed, asphalt pavement, roadsides); road transport structures (bridges, overpasses, overpasses, culverts under the embankment, noise barriers, etc.). All this must be taken into account especially during the construction of high-speed highways, such as the M-12, in order to effectively use the capabilities of intelligent transport infrastructure and unmanned vehicles [15-17].

Therefore, a modern highway should be considered as a complementary complex of engineering structures designed to ensure round-the-clock, off-season, safe and convenient movement. The design and complexity of transport facilities depends on the intensity of traffic, as well as on natural factors (climate, vegetation, hydrogeological conditions, soil and geological structure and terrain). The geometric increase in vehicle traffic without adequate infrastructure support generates a number of serious problems related to environmental degradation and deaths caused by road accidents.

As elements of road transport structures, drainage structures are arranged at the intersection of a highway with streams, ravines, etc., through which water flows from rains or snowmelt. Road transport construction requires a large number of prefabricated reinforced concrete products and structures manufactured at the factory; these include road curbs, spillway trays, culverts. Drainage trays are made of concrete of compressive strength class B20-B25, used for installation in traffic areas and pedestrian areas to collect and drain water from the surface of highways and sidewalks. Concrete drainage trays are operated in harsh conditions and must have high water resistance, frost resistance, abrasion resistance, resistance to the aggressive action of the aquatic environment and deicing saline solutions. One of the ways to improve the characteristics of steel-fiber-reinforced concrete road transport products is the treatment with various hydrophobic compounds [18].

Many domestic enterprises for the production of reinforced concrete products have mastered the bench technology of non-formwork molding, when it is possible to produce the

vast majority of products and structures for road transport purposes. All products produced on long non-formwork molding stands are prestressed, which significantly increases their bearing capacity and crack resistance. It should be noted that concrete in road transport structures that are susceptible to outdoor operation must have very high frost resistance and water resistance (W10 and more), and for road slabs it also has high operational wear resistance of the front layer [19].

The technological principles and methods of dispersed reinforcement in the process of targeted increase in the impact resistance of fiber-reinforced concrete structures of culverts largely depend on the type of matrices. For the manufacture of dispersed reinforced fiber-reinforced concrete, concretes with a certain aggregate granulometry are used, with unique characteristics of spatial ordering of nanostructures during the structuring of binders [20]. Sometimes it is advisable to use light concrete technologically; the type of fiber-reinforced concrete determines the nature of the rational direction of dispersed reinforcement and the geometric parameters of the dispersed reinforcement of the optimal compositions of the "concrete-fiber" composition.

Steel fiber concrete with a low percentage of reinforcement (not exceeding 1.0–1.5%) has the ability to perceive tensile stresses even after cracking: the introduced fiber reduces brittleness to some extent and provides the possibility of small deformations without destroying culverts. Impact-resistant fiber-reinforced concrete is indispensable in the construction of hydraulic structures, where the bending strength of the concrete composite plays an important role. Promising technologies are those that are suitable for the manufacture of structural elements from complex fiber-reinforced concrete in shock-resistant structures for transport purposes [21].

In conclusion, summarizing the results, it can be said that the structures of culverts for highways using steel fiber reinforced concrete have increased crack resistance, water resistance, impact resistance, tensile strength up to 30 MPa, which leads to a significant increase in their durability and operational reliability. The construction of culverts made of steel-fiber-reinforced concrete arches with a foundation slab has a multifunctional purpose and has prospects for use in a variety of ground conditions.

References

1. Vysotsky L.I., Izyumov Yu.A., Vysotsky I.S. Elements of drainage on highways. Saint Petersburg: Lan Publ., 2015. 192 p. EDN TXPJPD.
2. Solodkiy A.I., Gorev A.E., Bondareva E.D. Transport infrastructure. Moscow: Yurayt Publ. House, 2019. 290 p. EDN UUGXSV.

3. Zakolyukina E.S. Features of the functioning of transport infrastructure in the economy of the region // Creative economy. 2025. V.19, No.2. P.239-258. EDN JZODCH.
4. Tkachev A.A., Anokhin A.M., Belov V.A. et al. Water support and culvert hydraulic structures. Novocherkassk: Publ. "Lik", 2024. 250 p. EDN IXXKIU.
5. Nedoseko A.I., Khalikov R.M., Pavlov S.Yu. et al. Supramolecular improvement of the performance characteristics of asphalt-concrete road coverings by structuring additives of functional polymers // Smart composites in construction. 2025. V.6, No.4. P.43-54. EDN BGNCBM.
6. Leonovich S.N., Sadovskaya E.A. Strength indicators of fiber reinforced concrete with carbon nanomaterials // Science and Technique. 2024. V.23, No.3. P.219-224. EDN YKQKPX.
7. Bogushevich S.A., Samuilov V.M., Nevolin D.G. et al. High-speed highway M-12 Moscow – Tyumen: prospects and stages of construction // Innovative transport. 2022. No.1(43). P.3-7. EDN CQPVSF.
8. Khalikov R.M., Ivanova O.V., Pavlov S.Yu. et al. Innovative technologies in the construction of the Dyurtyuli-Achit section of the M-12 federal highway // Trends in the development of science and education. 2024. No.108-13. P.62-65. EDN SKRIKH.
9. Chernilnik A.A., Smachny V.Yu., Yelshaeva D.M. et al. The influence of the type of fiber fibers used on the strength and deformability of dispersed reinforced lightweight concretes // Bulletin of BSTU n.a V.G. Shukhov. 2022. No.2. P.20-29. EDN DFYXQD.
10. Babkov V.V., Nedoseko I.V., Distanov R.Sh. et al. Steel fiber reinforced concrete in the manufacture of road products and structures // Building materials. 2010. No.10. P.40-45. EDN NBIAT.
11. Khalikov R.M., Vildanova V.F. Macromolecular protective anticorrosion coating of steel pipelines // Actual problems of engineering: Materials of the Intern. conf. Ufa: BashSU, 2020. P.193-198. EDN BVOTYB.
12. Levkovich T.I., Mevlidinov Z.A., Fedin N.A. The use of fiber-reinforced concrete mixtures in the construction of foundations and road coverings // Transport structures. 2019. V.6, No.3. P.1. EDN ONXMTO.
13. Bondarev B.A., Sturova V.A., Liventseva A.A. The use of fiber-reinforced concrete in transport structures // Safety of the Russian construction fund: Materials of the International conf. Kursk: Publ. "Universit. the Book", 2023. P.243-247. EDN UHSTWB.
14. Sinitsin D.A., Khalikov R.M., Bulatov B.G. et al. Technological approaches to directed structure formation of construction nanocomposites with increased corrosion resistance // Nanotechnologies in Construction. 2019. V.11, No.2. P.153-164. EDN YEORWM.

15. Lipatov M.S., Maksimov Ya.V. Application of new technologies on the example of unmanned vehicles using artificial intelligence // International Journal of Professional Science. 2024. No.3-2. P.6-12. EDN WXBFLT.
16. Ivanova O.V., Pavlov S.Yu., Glazachev A.O. et al. Innovative unmanned vehicle operation technologies in high-speed federal highways // Modern innovations in engineering and technology: Collection of the Internat. conf. Kursk: Publ. "Universit. book", 2025. P.139-142. EDN XOADRL.
17. Khalikov R.M., Ivanova O.V., Pavlov S.Yu. et al. Intelligent transport infrastructure on the Dyurtyuli–Achit section of the M-12 federal expressway // Actual problems of science and education: Collection XLVIII Internat. conf. Moscow: Publ. "Academic Environment", 2026. P.41-50. EDN IBLPDM.
18. Ivanova O.V., Khalikov R.M., Salov A.S. et al. Technological equipment management for 3D additive printing of building nanocomposites // Nanotechnologies in Construction. 2021. V.13, No.2. P.117–123. [EDN PDLKKY](#).
19. Kinyagulova L.F., Khafizov A.A., Nedoseko A.I. et al. Improving the durability and operational reliability of concrete in road transport products and structures // Silicate engineering and technology. 2026. V.33, No.3. P.242-251. EDN CJCDWH.
20. Ivanova O.V., Glazachev A.O., Pavlov S.Y. et al. The in-demand application of artificial intelligence in traffic management of the M-12 motorway // Prospects for the development of technologies: Collection of the 3rd All-Russian conf. Voronezh: Publ. "Univer. book", 2025. P.167-170. EDN FXSFLT.
21. Morgun V.N., Bogatina A.Yu., Revyakin A.A. et al. Prospects for the use of complex reinforced concrete in building structures of transport infrastructure facilities // Transport of the Urals. 2021. No.2(69). P.63-67. EDN ZTBBCW.

CONCLUSION

The materials in issue 7(2) of the International Journal of Professional Science showcase a wide range of contemporary scientific and applied research aimed at improving the efficiency, reliability, and quality of professional work. The authors examine both the theoretical aspects of the problems under study and practical solutions applicable to construction, industry, transportation, digital technologies, and management.

The presented works emphasize the importance of an interdisciplinary approach, the implementation of innovative technologies, automation, intelligent systems, and modern analytical methods. This issue will be useful to researchers, engineers, educators, manufacturing specialists, and all readers interested in the development of professional science and practice.

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

Electronic scientific editions

International journal of Professional Science

international scientific journal
№7(2)/2026

Please address for questions and comments for publication as well as suggestions
for cooperation to e-mail address mail@scipro.ru



Format 60x84/16. Conventional printed
sheets 6,6
Circulation 100 copies
Scientific public organization
“Professional science”