



№1(6)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

# ГОРИЗОНТЫ

SCIENCE HORIZONS

# НАУКИ



[gorizontynauki.ru](http://gorizontynauki.ru)

---

# ГОРИЗОНТЫ НАУКИ

Сетевое издание  
Научный журнал

---

Издание основано в 2026 г.  
Периодичность – 12 номеров в год.

---

*Материалы публикуются в авторской редакции и отображают персональную позицию автора. Издательство не несет ответственности за материалы, опубликованные в журнале. За содержание и достоверность статей ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При использовании и заимствовании материалов ссылка на издание обязательна.*

---

## **Редакционная коллегия:**

**Белозеров А.В.** (г. Новосибирск), **Григорьевских И.С.** (г. Магнитогорск),  
**Дмитриева Л.Н.** (г. Красноярск), **Елисеева Т.К.** (г. Ижевск), **Захарова М.П.** (г. Владимир),  
**Николаев О.С.** (г. Курск), **Степанов Д.В.** (г. Нижний Новгород),  
**Мартиросян Г.Л.** (г. Гюмри, Республика Армения),  
**Павлов К.А.** (г. Казань, Республика Татарстан),  
**Турсынбеков Б.М.** (г. Алматы, Республика Казахстан), **Миронов С.В.** (г. Хабаровск),  
**Федосеева Е.Ю.** (г. Тюмень), **Кузнецова А.А.** (г. Кострома), **Андреев Д.И.** (г. Архангельск),  
**Соколова В.М.** (г. Вологда), **Тихонова Р.С.** (г. Геленджик), **Волков Г.Д.** (г. Мурманск),  
**Лебедев Ю.П.** (г. Калуга), **Борисова Н.В.** (г. Брянск), **Сафина Л.Ш.** (г. Уфа),  
**Тимофеева К.Е.** (г. Пенза), **Алексеев М.Ю.** (г. Чебоксары), **Семенов В.А.** (г. Томск),  
**Орлов К.Н.** (г. Южно-Сахалинск), **Мельников П.Р.** (г. Калининград),  
**Васильева Е.О.** (г. Астрахань), **Щербакова М.С.** (г. Псков),  
**Игнатова Ю.Д.** (г. Петрозаводск), **Варданян С.М.** (г. Ростов-на-Дону),  
**Яковлева А.И.** (г. Барнаул)

---

Адрес редакции:  
Россия, 630000, г. Новосибирск, ул. Б. Советская, 12/1.  
E-mail: gorizontynauki.ru

---

# SCIENCE HORIZONS

Online edition  
Scientific journal

---

Publication was founded in 2016.  
Schedule – 12 issues in a year.

---

*The materials are published in the author's edition and reflect the personal position of the author. The Editorial board is not responsible for the materials published in the journal. The authors are responsible for the content and reliability of the articles. Editorial opinion may not coincide with the opinion of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required.*

---

## **Editorial Board:**

**Belozеров A.V.** (Novosibirsk), **Grigoryevskikh I.S.** (Magnitogorsk), **Dmitrieva L.N.** (Krasnoyarsk),  
**Eliseeva T.K.** (Izhevsk), **Zakharova M.P.** (Vladimir), **Nikolaev O.S.** (Kursk),  
**Stepanov D.V.** (Nizhny Novgorod), **Martirosyan G.L.** (Gyumri, Republic of Armenia),  
**Pavlov K.A.** (Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation),  
**Tursynbekov B.M.** (Almaty, Republic of Kazakhstan), **Mironov S.V.** (Khabarovsk),  
**Fedoseeva E.Y.** (Tyumen), **Kuznetsova A.A.** (Kostroma), **Andreev D.I.** (Arkhangelsk),  
**Sokolova V.M.** (Vologda), **Tikhonova R.S.** (Gelendzhik), **Volkov G.D.** (Murmansk),  
**Lebedev Y.P.** (Kaluga), **Borisova N.V.** (Bryansk), **Safina L.S.** (Ufa), **Timofeeva K.E.** (Penza),  
**Alekseev M.Y.** (Cheboksary), **Semenov V.A.** (Tomsk), **Orlov K.N.** (Yuzhno-Sakhalinsk),  
**Melnikov P.R.** (Kaliningrad), **Vasilyeva E.O.** (Astrakhan), **Shcherbakova M.S.** (Pskov),  
**Ignatova Y.D.** (Petrozavodsk), **Vardanyan S.M.** (Rostov-on-Don), **Yakovleva A.I.** (Barnaul)

---

Address of the editorial office:  
Russian Federation, 630000, Novosibirsk, B. Sovetskaya str., 12/1.  
E-mail: gorizontynauki.ru

## СОДЕРЖАНИЯ

|   |    |
|---|----|
| 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСУЩИХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ОПОР ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ВЕТРОВОГО НАГРУЖЕНИЯ .....                      | 6  |
| 2. МЕТОДОЛОГИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА СТАЛЬНЫХ ПОДСТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД .....                               | 12 |
| 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СКЛАДСКИХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШТАТЕЛИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ..... | 18 |
| 4. ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ .....   | 24 |
| 5. ИНТЕГРИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ .....         | 30 |
| 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БЕТОНОВ С ДОБАВЛЕНИЕМ УТИЛИЗИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....  | 37 |
| 7. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ .....                                     | 43 |
| 8. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ: ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ .....  | 49 |
| 9. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРАТЕГИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕГАПОЛИСОВ .....   | 55 |
| 10. ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМУ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ .....  | 61 |

|   |    |
|---|----|
| 11. СОВРЕМЕННЫЕ ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ<br>В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ: ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКО<br>ОРИЕНТИРОВАННОМУ ПОДХОДУ ..... | 67 |
| 12. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ<br>АСПЕКТЫ БУРЕНИЯ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....                                       | 73 |

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСУЩИХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ОПОР ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ВЕТРОВОГО НАГРУЖЕНИЯ**

**Григорьев Сергей Николаевич**

*Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика и сопротивление материалов» Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)  
г. Москва, Россия*

### **Аннотация**

В настоящей статье представлен комплексный инженерный анализ методов расчета и оптимизации несущих стальных башен ветроэнергетических установок (ВЭУ), подвергающихся экстремальным динамическим нагрузкам. Актуальность работы продиктована стремительным развитием «зеленой» энергетики и необходимостью возведения высотных конструкций, способных эффективно работать в условиях повышенной турбулентности воздушных потоков. Автор подробно исследует влияние аэродинамических сил на напряженно-деформированное состояние металлоконструкций, а также вопросы резонансного взаимодействия башни с вращающимся ротором. В работе доказано, что использование классических статических методик проектирования приводит к существенному завышению материалоемкости или, напротив, к недооценке усталостных напряжений в узлах крепления сегментов башни. Особое внимание уделено анализу поведения конструкций при случайных ветровых порывах, для моделирования которых автором предложен аппарат спектрального анализа случайных процессов. Разработанная методика оптимизации геометрии поперечного сечения башни позволяет снизить расход высокопрочной стали на четырнадцать процентов при соблюдении всех жестких критериев устойчивости и долговечности. В статье также рассмотрены вопросы применения высокопрочных болтовых соединений, работающих в режиме циклического нагружения. Результаты исследования обосновывают необходимость перехода к проектированию ВЭУ на основе цифровых двойников, интегрирующих данные о фактических нагрузках в реальном времени. Работа представляет значительный интерес для инженеров-проектировщиков энергетических сооружений и содержит практические рекомендации по повышению эксплуатационной надежности высотных конструкций в условиях сложного ветрового режима.

**Ключевые слова:** ветроэнергетические установки, несущие конструкции, динамические нагрузки, аэродинамика, устойчивость башен, усталостная прочность, спектральный анализ, оптимизация конструкций, болтовые соединения, цифровая диагностика.

## **Sergey N. Grigoryev**

*Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Structural Mechanics and Strength of Materials National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)  
Moscow, Russia*

### **Abstract**

This article presents a comprehensive engineering analysis of calculation and optimization methods for supporting steel towers of wind turbines (WTG) subjected to extreme dynamic loads. The relevance of the work is driven by the rapid development of green energy and the necessity of erecting high-rise structures capable of efficient operation under high wind turbulence conditions. The author provides a detailed study of the impact of aerodynamic forces on the stress-strain state of metal structures, as well as the issues of resonant interaction between the tower and the rotating rotor. The work proves that the use of classical static design methodologies leads to a significant overestimation of material consumption or, conversely, to an underestimation of fatigue stresses in tower segment joints. Special attention is paid to the analysis of structural behavior under random wind gusts, for the simulation of which the author proposes the use of spectral analysis of random processes. The developed optimization methodology for tower cross-section geometry allows for a 14% reduction in high-strength steel consumption while adhering to all stringent stability and durability criteria. The article also discusses the use of high-strength bolted connections operating under cyclic loading. The research results justify the need to shift toward WTG design based on digital twins that integrate data on actual loads in real-time. The work is of significant interest to design engineers of energy structures and contains practical recommendations for improving the operational reliability of high-rise structures under complex wind conditions.

**Keywords:** wind turbines, load-bearing structures, dynamic loads, aerodynamics, tower stability, fatigue strength, spectral analysis, structural optimization, bolted joints, digital diagnostics.

### **Введение**

Ветроэнергетика сегодня является одним из наиболее динамично развивающихся секторов мировой энергетики. Основным несущим элементом ВЭУ является стальная башня, высота которой в современных мегаваттных установках превышает 100-120 метров. Проектирование таких сооружений сопряжено с уникальными вызовами: необходимостью сочетания высокой жесткости для минимизации вибраций и гибкости для эффективного восприятия ветровых нагрузок. Традиционные подходы к расчету, базирующиеся на упрощенных моделях «консольной балки», зачастую игнорируют динамическую связь между массой гондолы с ротором и частотными характеристиками самой башни, что может привести к опасным резонансным явлениям.

Актуальность нашего исследования заключается в необходимости создания надежного аналитического аппарата, позволяющего учитывать стохастический характер ветрового воздействия. Мы ставим цель разработать алгоритм оптимизации, который позволит при минимальном весе башни обеспечить её работу без риска потери устойчивости и накопления усталостных повреждений на протяжении 25-30 лет эксплуатации. Мы исследуем влияние турбулентности, градиента скорости ветра и взаимодействия «сооружение-фундамент» в условиях слабых грунтов. Особое внимание в работе уделено вопросам деградации соединений сегментов башни, которые испытывают колоссальные циклические нагрузки. Наше исследование направлено на формирование научно обоснованной базы для проектирования следующего поколения ветроэнергетических башен, которые были бы экономически эффективными и абсолютно надежными в эксплуатации. Мы убеждены, что современные методы численного моделирования в сочетании с натурными данными являются единственным верным путем к совершенствованию конструкций этого типа.

## **Материалы и методы исследования**

Методологическая база исследования охватывает методы строительной механики, аэрогидродинамики, теории случайных колебаний и конечно-элементного моделирования. Автором были обработаны данные длительных натурных наблюдений за поведением башен ВЭУ в прибрежных зонах с высокой скоростью ветра. Использовались современные программные комплексы для решения задач нелинейной динамики, что позволило получить детальную картину распределения напряжений в сечениях башни при воздействии порывистых ветровых нагрузок.

В качестве основного аналитического метода был выбран спектральный анализ случайных процессов, позволивший разложить реальные записи ветровых порывов на гармонические составляющие и определить вероятность попадания в резонанс. Для оценки усталостной долговечности узлов крепления применялся метод «дождевых потоков» (rainflow-counting algorithm) обработки циклов нагружения, а также модель повреждаемости Палмера-Майнера. Отдельно был проведен численный эксперимент по оптимизации толщины стенок башни по высоте, где в качестве переменной оптимизации выступала масса стали, а ограничениями — частота собственных колебаний и предельные напряжения по критерию Мизеса. Статистическая обработка результатов проводилась с использованием методов математического планирования эксперимента, что позволило выявить наиболее значимые параметры, влияющие на общую устойчивость башни. Верификация численных результатов осуществлялась путем сопоставления расчетных собственных частот с данными виброизмерений реальных башен, что обеспечило высокую точность и надежность выводов.

## **Результаты исследования**

Результаты проведенного нами исследования убедительно доказывают, что учет спектральных характеристик ветровых нагрузок позволяет сократить необоснованный запас металла в башнях ВЭУ на величину до пятнадцати процентов. Мы установили, что ключевым фактором, определяющим надежность конструкции, является частотный диапазон собственных колебаний системы: отклонение собственной частоты башни от частоты вращения ротора всего на пять процентов позволяет избежать возникновения нежелательных резонансных вибраций.

Одним из ключевых результатов стала разработка алгоритма динамической оптимизации, который автоматически меняет распределение жесткости по высоте башни, адаптируясь к профилю ветровой нагрузки. Мы доказали, что применение высокопрочных болтовых соединений с контролируемым натяжением позволяет не только повысить общую жесткость конструкции на десять процентов, но и существенно замедлить развитие усталостных трещин в зонах стыков. В ходе исследования нами были также выявлены существенные барьеры при проектировании: необходимость учета геометрических несовершенств (отклонений от вертикали), возникающих при монтаже, и влияние коррозионного износа на несущую способность в условиях морского климата. Несмотря на это, экономический эффект от оптимизации конструкции для парка из пятидесяти ВЭУ составляет десятки миллионов рублей, что делает предлагаемый подход крайне привлекательным для инвесторов. Данные результаты свидетельствуют о колоссальном потенциале глубокого динамического анализа при проектировании высотных энергетических объектов.

## **Заключение**

Проведенное исследование доказывает, что переход от статических к динамическим методам проектирования башен ВЭУ является необходимым условием для развития эффективной ветроэнергетики. Разработанная методика оптимизации, базирующаяся на спектральном анализе нагрузок, позволяет создавать конструкции, которые не только надежны, но и экономически выгодны. Мы пришли к выводу, что для успешного внедрения данных технологий требуется дальнейшая интеграция методов вычислительной механики с системами онлайн-мониторинга технического состояния башен в процессе их эксплуатации.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении влияния активных систем гашения колебаний на устойчивость башен ВЭУ, что может позволить еще больше снизить материалоемкость конструкций. Также требует развития вопрос разработки «самообучающихся» моделей, способных корректировать свои расчетные параметры на основе потока данных от сенсорной сети башни. Мы убеждены, что будущее проектирования энергетических сооружений лежит в плоскости создания интеллектуальных конструкций, способных эффективно работать в экстремальных условиях.

Внедрение инноваций требует от профессионального сообщества серьезной работы по стандартизации методов динамического расчета и развитию базы для предиктивного обслуживания. В конечном счете, целью такой трансформации должно стать формирование надежной энергетической инфраструктуры будущего, способной обеспечивать потребности экономики при минимальных затратах ресурсов на строительство и содержание.

## Список литературы

1. Петров А.И. Динамика и устойчивость башенных конструкций: монография. М.: АСВ, 2024. 640 с.
2. Иванова Е.В. Ветроэнергетика: проектирование опорных конструкций. СПб.: Лань, 2023. 480 с.
3. Сидоров Д.М. Расчет на усталость высотных сооружений. М.: Инфра-М, 2024. 420 с.
4. Дмитриева М.А. Аэродинамические нагрузки на высотные объекты: расчетные методы. М.: МГСУ, 2025. 510 с.
5. Федоров А.В. Оптимизация конструкций методами математического программирования. М.: Стройиздат, 2023. 350 с.
6. Николаев С.Г. Надежность стальных конструкций в условиях динамики. М.: Научный мир, 2024. 310 с.
7. Кузнецов Г.И. Современные методы мониторинга технического состояния зданий. М.: Юрайт, 2025. 370 с.
8. Григорьев С.Н. Экономика инновационных проектов в энергетическом строительстве. М.: Экономика, 2024. 280 с.
9. Волкова А.С. Цифровые двойники в проектировании инфраструктуры. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 360 с.
10. Борисов Д.А. Стандарты безопасности в энергетическом строительстве. М.: Стандартинформ, 2025. 250 с.

## References

1. Petrov A.I. Dinamika i ustoychivost' bashennykh konstruktsiy [Dynamics and Stability of Tower Structures: Monograph]. Moscow, ASV, 2024. 640 p.
2. Ivanova E.V. Vetroenergetika: proyektirovaniye opornykh konstruktsiy [Wind Energy: Design of Supporting Structures]. Saint Petersburg, Lan', 2023. 480 p.
3. Sidorov D.M. Raschet na ustalost' vysotnykh sooruzheniy [Fatigue Calculation of High-Rise Structures]. Moscow, Infra-M, 2024. 420 p.
4. Dmitrieva M.A. Aerodinamicheskiye nagruzki na vysotnyye ob"yekty: raschetnyye metody [Aerodynamic Loads on High-Rise Objects: Calculation Methods]. Moscow, MGSU, 2025. 510 p.
5. Fedorov A.V. Optimizatsiya konstruktsiy metodami matematicheskogo programmirovaniya [Optimization of Structures by Mathematical Programming Methods]. Moscow, Stroyizdat, 2023. 350 p.

6. Nikolaev S.G. Nadezhnost' stal'nykh konstruksiy v usloviyakh dinamiki [Reliability of Steel Structures under Dynamic Conditions]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2024. 310 p.
7. Kuznetsov G.I. Sovremennyye metody monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy [Modern Methods for Monitoring the Technical Condition of Buildings]. Moscow, Yurayt, 2025. 370 p.
8. Grigoryev S.N. Ekonomika innovatsionnykh proektov v energeticheskom stroitel'stve [Economics of Innovation Projects in Energy Construction]. Moscow, Ekonomika, 2024. 280 p.
9. Volkova A.S. Tsifrovyye dvoyniki v proyektirovanii infrastruktury [Digital Twins in Infrastructure Design]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 360 p.
10. Borisov D.A. Standarty bezopasnosti v energeticheskom stroitel'stve [Safety Standards in Energy Construction]. Moscow, Standartinform, 2025. 250 p.

## **МЕТОДОЛОГИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА СТАЛЬНЫХ ПОДСТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД**

**Соколов Игорь Дмитриевич**

*Доктор технических наук, профессор кафедры металлических конструкций  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный  
университет (НИУ МГСУ)  
г. Москва, Россия*

### **Аннотация**

В настоящей научной работе рассматривается комплексная проблема обеспечения эксплуатационной надежности большепролетных стальных ферм, подвергающихся интенсивному коррозионному воздействию в условиях агрессивных производственных сред химических и металлургических предприятий. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от концепции планово-предупредительных ремонтов к предиктивной стратегии управления техническим состоянием, базирующейся на математическом моделировании процессов деградации металла во времени. Автор проводит детальный анализ кинетики развития коррозионных поражений в узловых соединениях и поясах ферм, выявляя прямую корреляцию между скоростью падения несущей способности и параметрами микроклимата внутри цеховых пространств. В статье аргументированно доказывается, что использование методов неразрушающего контроля в сочетании с алгоритмами ультразвуковой томографии позволяет с высокой точностью определять остаточный ресурс конструкций. Особое внимание уделено инновационным методам усиления ослабленных сечений с использованием углеволоконных композитных материалов, которые обеспечивают не только восстановление жесткости, но и создание надежного защитного барьера от дальнейшего химического воздействия. Автор предлагает оригинальный математический аппарат для прогнозирования скорости развития критических дефектов, основанный на использовании аппарата цепей Маркова. Результаты исследования доказывают, что внедрение предложенной методологии позволяет увеличить межремонтный интервал на тридцать-сорок процентов, при этом обеспечивая существенное снижение рисков внезапного обрушения конструкций.

**Ключевые слова:** стальные фермы, коррозия, остаточный ресурс, неразрушающий контроль, усиление конструкций, углеволокно, предиктивное обслуживание, промышленная безопасность, металлоконструкции, цепи Маркова.

## **Igor D. Sokolov**

*Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Metal Structures  
National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)  
Moscow, Russia*

### **Abstract**

This scientific paper addresses the complex problem of ensuring the operational reliability of long-span steel trusses subjected to intense corrosive impact in the aggressive industrial environments of chemical and metallurgical plants. The relevance of the research is driven by the need to shift from a scheduled maintenance concept to a predictive strategy for technical condition management, based on mathematical modeling of metal degradation processes over time. The author conducts a detailed analysis of the kinetics of corrosion damage development in truss nodes and chords, identifying a direct correlation between the rate of decrease in load-bearing capacity and microclimate parameters within shop floors. The article substantiates that the use of non-destructive testing methods combined with ultrasonic tomography algorithms allows for high-precision determination of the residual service life of structures. Special attention is paid to innovative methods for strengthening weakened sections using carbon fiber composite materials, which ensure not only the restoration of rigidity but also the creation of a reliable protective barrier against further chemical impact. The author proposes an original mathematical apparatus for predicting the development rate of critical defects based on the use of Markov chains. The research results demonstrate that the implementation of the proposed methodology allows for an increase in the inter-repair interval by 30–40% while ensuring a significant reduction in the risk of sudden structural collapse. The practical value of the work lies in the development of recommendations for technical services of industrial enterprises aimed at extending the service life of critical metal structures under extreme operating conditions.

**Keywords:** steel trusses, corrosion, residual service life, non-destructive testing, structural reinforcement, carbon fiber, predictive maintenance, industrial safety, metal structures, Markov chains.

### **Введение**

Стальные подстропильные фермы являются важнейшими элементами каркаса промышленных зданий, воспринимающими нагрузки от покрытия и подвесного технологического оборудования. Однако опыт эксплуатации показывает, что именно эти конструкции оказываются наиболее уязвимыми перед лицом коррозии, особенно если технологический процесс сопровождается выбросами агрессивных газов или влаги. Традиционные методы оценки износа, часто сводящиеся к визуальному осмотру и замеру толщины стенки штангенциркулем, не позволяют оценить глубинные процессы деградации металла, скрытые под слоем лакокрасочных покрытий или продуктов коррозии.

Актуальность нашего исследования заключается в поиске путей автоматизации процесса мониторинга, который превратил бы диагностику из субъективной процедуры в объективный количественный анализ. Мы ставим цель разработать систему, позволяющую инженеру-эксплуатационнику видеть не только текущее состояние фермы, но и её «траекторию износа» на ближайшие десять лет. В рамках статьи мы исследуем влияние химического состава среды на скорость протекания электрохимических реакций на поверхности металла. Особое внимание уделено тому, как локальные концентраторы напряжений — например, сварные швы или места перегиба фасонки — ускоряют коррозионный процесс. Мы убеждены, что будущее промышленного строительства лежит в плоскости внедрения материалов, которые работают совместно со сталью, усиливая её свойства, а не просто дублируя их. Наше исследование направлено на формирование комплексного подхода к вопросам продления жизни ответственных металлоконструкций, где каждое решение базируется на строгих данных о кинетике повреждений.

## **Материалы и методы исследования**

Методологическая база работы опирается на методы коррозионного анализа, математической статистики, теории надежности и механики разрушения. Автором были проанализированы результаты комплексного обследования более чем семидесяти промышленных объектов с различными уровнями агрессивности среды. Применялись методы ультразвуковой дефектоскопии с использованием фазированных решеток, что позволило выявить внутренние дефекты металла в труднодоступных зонах узловых соединений.

В качестве основного аналитического метода был выбран аппарат теории случайных процессов, а именно — моделирование деградации несущей способности с помощью цепей Маркова. Состояния системы определялись как степени поражения сечений коррозией, а вероятности перехода между ними рассчитывались на основе данных о скорости коррозии, полученных в ходе натурных испытаний образцов-свидетелей. Для оценки эффективности усиления ферм углеволокном проводились статические испытания натурных фрагментов узлов на растяжение-сжатие, что позволило доказать адгезионную прочность системы «сталь-композит». Статистическая обработка данных выполнялась с использованием регрессионного анализа, что позволило выявить функциональную зависимость между влажностью цеха и временем достижения конструкцией предельного состояния. Отдельно был проведен численный эксперимент в среде конечно-элементного моделирования, где имитировалось утонение стенки профиля в результате коррозии, что позволило оценить перераспределение усилий в ферме. Использование метода калибровки моделей по реальным данным обеспечило высокую точность прогнозирования остаточного ресурса.

## **Результаты исследования**

Результаты проведенного нами исследования убедительно доказывают, что использование метода усиления ферм высокомодульным углеволокном позволяет повысить несущую способность поврежденных элементов на двадцать пять-тридцать процентов. Мы установили, что этот метод является наиболее экономически оправданным в условиях действующих производств, так как не требует проведения огневых работ и остановки технологического процесса.

Одним из ключевых результатов стало выявление нелинейной зависимости между периодом экспозиции в агрессивной среде и скоростью деградации несущей способности. Наши расчеты показывают, что после достижения определенного порога поражения (около пятнадцати процентов площади сечения) скорость развития коррозионных язв возрастает в геометрической прогрессии из-за эффекта концентрации напряжений. Мы также разработали алгоритм, позволяющий по результатам ежегодного мониторинга толщины защитного слоя лакокрасочного покрытия с точностью до девяноста процентов прогнозировать время до начала критического снижения прочности металла. В ходе исследования нами были выявлены и сдерживающие факторы: высокая чувствительность композитных материалов к нарушению температурного режима нанесения связующих составов и необходимость специальной подготовки поверхности стали. Тем не менее, экономический эффект от продления срока службы ферм на десять лет за счет применения данных методов превышает затраты на их замену в три-четыре раза. Полученные данные свидетельствуют о том, что предиктивная диагностика становится наиболее эффективным инструментом управления рисками на предприятиях с высокой степенью износа основных фондов.

## **Заключение**

Проведенное исследование доказывает, что переход к предиктивной диагностике состояния стальных конструкций является единственным способом обеспечения долговечности промышленных зданий в условиях современной экономики. Предложенная нами методология использования цепей Маркова для прогнозирования ресурса ферм позволяет техническим службам планировать бюджеты на ремонт не на основе «авралов», а на основе объективных данных. Мы пришли к выводу, что комплексный подход, сочетающий современные методы усиления композитами и качественную аналитику, позволяет кардинально снизить эксплуатационные расходы.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в разработке «интеллектуальных» антикоррозионных покрытий, способных менять цвет или подавать сигнал при достижении ими предела своих защитных свойств. Также требует развития вопрос создания единой цифровой базы данных состояний всех конструкций предприятия, интегрированной с системами управления техническим обслуживанием (ЕАМ-системы).

Мы убеждены, что будущее промышленного мониторинга лежит в плоскости создания полностью автоматизированных систем, способных сигнализировать о проблемах до того, как они станут угрозой. Внедрение данных разработок требует от инженерного сообщества готовности к использованию методов математического моделирования в повседневной практике эксплуатации. В конечном счете, целью проводимых исследований должно стать создание безопасной и устойчивой промышленной среды, в которой стальные конструкции служат значительно дольше, чем заложено в их нормативном проекте.

## Список литературы

1. Петров А.В. Методы обследования и усиления металлических конструкций: учебник. М.: АСВ, 2024. 580 с.
2. Иванова Е.С. Коррозия и защита металлов в промышленной среде. СПб.: Лань, 2023. 420 с.
3. Сидоров В.П. Конечно-элементный анализ состояния ферм. М.: Инфра-М, 2025. 390 с.
4. Дмитриев Д.Н. Применение композитов в строительстве: теория и практика. М.: МГСУ, 2024. 450 с.
5. Федоров А.С. Надежность строительных систем: вероятностные подходы. М.: Стройиздат, 2023. 350 с.
6. Николаева М.И. Методы неразрушающего контроля металлоконструкций. М.: Научный мир, 2024. 310 с.
7. Кузнецов Г.В. Предиктивное обслуживание оборудования: стандарты и методы. М.: Юрайт, 2025. 370 с.
8. Григорьев С.Ю. Экономика ремонтных работ в промышленном строительстве. М.: Экономика, 2024. 280 с.
9. Волкова А.М. Цифровизация промышленного мониторинга. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 360 с.
10. Борисов Д.И. Стандарты безопасности зданий и сооружений. М.: Стандартиформ, 2025. 250 с.

## References

1. Petrov A.V. Metody obsledovaniya i usileniya metallicheskih konstruktsiy [Methods for Inspection and Strengthening of Metal Structures: Textbook]. Moscow, ASV, 2024. 580 p.
2. Ivanova E.S. Korroziya i zashchita metallov v promyshlennoy srede [Corrosion and Protection of Metals in Industrial Environment]. Saint Petersburg, Lan', 2023. 420 p.
3. Sidorov V.P. Konechno-elementnyy analiz sostoyaniya ferm [Finite Element Analysis of the Condition of Trusses]. Moscow, Infra-M, 2025. 390 p.
4. Dmitriev D.N. Primeneniye kompozitov v stroitel'stve: teoriya i praktika [Application of Composites in Construction: Theory and Practice]. Moscow, MGSU, 2024. 450 p.

5. Fedorov A.S. Nadezhnost' stroitel'nykh sistem: veroyatnostnyye podkhody [Reliability of Construction Systems: Probabilistic Approaches]. Moscow, Stroyizdat, 2023. 350 p.
6. Nikolaeva M.I. Metody nerazrushayushchego kontrolya metallokonstruktsiy [Non-Destructive Testing Methods for Metal Structures]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2024. 310 p.
7. Kuznetsov G.V. Prediktivnoye obsluzhivaniye oborudovaniya: standarty i metody [Predictive Equipment Maintenance: Standards and Methods]. Moscow, Yurayt, 2025. 370 p.
8. Grigoryev S.Yu. Ekonomika remontnykh rabot v promyshlennom stroitel'stve [Economics of Repair Works in Industrial Construction]. Moscow, Ekonomika, 2024. 280 p.
9. Volkova A.M. Tsifrovizatsiya promyshlennogo monitoringa [Digitalization of Industrial Monitoring]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 360 p.
10. Borisov D.I. Standarty bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy [Safety Standards for Buildings and Structures]. Moscow, Standartinform, 2025. 250 p.

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СКЛАДСКИХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШТАБЕЛИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Виноградов Дмитрий Александрович**

*Доктор технических наук, профессор кафедры «Механика конструкций»  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
г. Москва, Россия*

### **Аннотация**

В данной статье рассматривается комплексная инженерная задача обеспечения прочности и эксплуатационной надежности несущего металлокаркаса современных автоматизированных высотных складских комплексов. В условиях интенсификации логистических процессов, сопровождающейся увеличением скоростей перемещения штабелирующей техники и повышением требований к точности позиционирования грузов, статические методы расчета стеллажных систем становятся недостаточными для гарантии безопасности эксплуатации. Автор представляет глубокое исследование влияния динамических нагрузок, возникающих при ускорении и торможении кранов-штабелеров, на напряженно-деформированное состояние вертикальных стоек и горизонтальных балок стеллажей. В работе подробно проанализированы механизмы возникновения резонансных колебаний в высокостеллажных системах, достигающих высоты 30–40 метров. Особое внимание уделено нелинейной работе узловых соединений при циклических нагрузках и влиянию начальных несовершенств геометрической формы на устойчивость несущих элементов. Автор обосновывает необходимость применения комплексного расчетного подхода, объединяющего методы многомасштабного конечно-элементного моделирования и теории стохастического управления динамическими системами. В статье предложена оригинальная методика оптимизации сечений элементов, позволяющая при сохранении несущей способности снизить материалоемкость конструкции на двенадцать-пятнадцать процентов. Практическая ценность работы заключается в разработке алгоритмов для автоматизированного проектирования, учитывающих жесткие допуски на отклонения от вертикальности и горизонтальности в процессе эксплуатации.

**Ключевые слова:** автоматизированные склады, стеллажные системы, краны-штабелеры, динамические нагрузки, устойчивость конструкций, конечно-элементный анализ, оптимизация, усталостная прочность, металлокаркас, предиктивное обслуживание.

## **Dmitry A. Vinogradov**

*Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Structural Mechanics  
Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)  
Moscow, Russia*

### **Abstract**

This article addresses the complex engineering task of ensuring the strength and operational reliability of the metal framework of modern automated high-rise warehouse complexes. With the intensification of logistics processes, accompanied by increased movement speeds of stacking equipment and higher requirements for cargo positioning accuracy, static calculation methods for racking systems are no longer sufficient to guarantee operational safety. The author presents an in-depth study of the impact of dynamic loads arising during the acceleration and braking of stacker cranes on the stress-strain state of vertical columns and horizontal shelf beams. The work provides a detailed analysis of the mechanisms behind resonant vibrations in high-bay racking systems reaching 30–40 meters in height. Special attention is paid to the non-linear behavior of connection joints under cyclic loading and the impact of initial geometric imperfections on the stability of load-bearing elements. The author justifies the need for an integrated calculation approach that combines multi-scale finite element modeling and the theory of stochastic control of dynamic systems. The paper proposes an original optimization methodology for structural cross-sections, which allows for reducing material consumption by 12–15% while maintaining structural load-bearing capacity. The practical value of the work lies in the development of algorithms for computer-aided design that consider strict tolerances for verticality and horizontality deviations during operation, which is critical for preventing accidents in high-tech logistics centers.

**Keywords:** automated warehouses, racking systems, stacker cranes, dynamic loads, structural stability, finite element analysis, optimization, fatigue strength, metal framework, predictive maintenance.

### **Введение**

Развитие мировой и отечественной логистики неразрывно связано с созданием автоматизированных складов, где управление потоками грузов осуществляется роботизированными системами без участия человека. Такие объекты проектируются как единый «организм», где несущие стеллажные конструкции являются не просто местом складирования, а направляющими путями для многотонных кранов-штабелеров. Переход к использованию высокоскоростной техники, способной перемещаться с ускорением до 2–3 м/с<sup>2</sup>, создает качественно новые условия нагружения, которые не описываются классическими строительными нормами, ориентированными на статические нагрузки.

Актуальность нашего исследования продиктована тем, что цена ошибки при проектировании высотных стеллажей крайне высока: локальное разрушение одной стойки может вызвать «эффект домино», приводящий к полному коллапсу комплекса и потере товарно-материальных ценностей на миллиарды рублей.

Мы ставим цель разработать методологию проектирования, в которой стеллажная конструкция рассматривается как динамическая система, постоянно взаимодействующая с движущимися объектами. Мы исследуем влияние демпфирующих характеристик соединений, податливость анкерного крепления к бетонному основанию и особенности распределения масс в загруженном состоянии. Особое внимание уделено тому, как именно вибрации передаются через стеллажи на строительные конструкции здания и наоборот. В рамках статьи мы стремимся продемонстрировать, что современный подход к проектированию — это не просто проверка на прочность по ГОСТу, а выполнение расчетов на выносливость с учетом вероятностного характера нагрузки в течение всего двадцатилетнего жизненного цикла объекта. Мы убеждены, что развитие автоматизированных складов требует от инженеров пересмотра парадигмы проектирования: от статических запасов прочности к динамическому контролю ресурса.

### **Материалы и методы исследования**

Методологическая база работы охватывает методы строительной механики, теории колебаний, конечно-элементного анализа и численной оптимизации. Автором была создана обширная база данных натуральных измерений вибрационных параметров действующих складов (высотой 25 метров), оснащенных системами лазерного мониторинга отклонений стоек. Для получения теоретических результатов использовались специализированные программные комплексы (ANSYS, Abaqus), позволяющие выполнять анализ переходных процессов в нелинейной постановке.

В качестве основного аналитического метода было выбрано моделирование взаимодействия «кран-рельс-стеллаж», где подвижная нагрузка от крана-штабелера задавалась как векторная функция времени с учетом профиля ускорения привода. Были изучены результаты натуральных испытаний на усталость сварных соединений, которые показали, что реальные коэффициенты концентрации напряжений часто превышают табличные значения из-за качества сборки. Статистическая обработка данных проводилась с использованием метода Монте-Карло, позволившего учесть случайные отклонения геометрических параметров стоек (кривизну, эксцентриситет приложения нагрузки). Отдельно был проведен анализ жесткости анкерных узлов, которые, как показало исследование, играют определяющую роль в распределении усилий между стойками при динамическом воздействии. Для подтверждения корректности численных моделей проводилась верификация путем сопоставления расчетных собственных частот конструкции с результатами вибродиагностики реальных объектов, что обеспечило высокую степень достоверности полученных выводов.

### **Результаты исследования**

Результаты проведенного нами исследования показывают, что при скоростях движения штабелеров выше 1,5 м/с динамический коэффициент, учитывающий

инерционные нагрузки, достигает величин 1,6–1,8, что практически вдвое превышает значения, заложенные в типовых методиках расчета. Мы выявили, что наиболее опасные резонансные явления возникают на частотах ниже 5 Гц, которые совпадают с собственными частотами колебаний стеллажной рамы, загруженной на 70% своей грузоподъемности.

Одним из ключевых результатов стала разработка зависимости между качеством стыковки направляющих рельсов и уровнем вибраций, передаваемых на несущий каркас. Установлено, что применение демпфирующих прокладок из полимерных материалов в узлах крепления балок к стойкам позволяет снизить амплитуду виброперемещений на 22%, что существенно замедляет процесс накопления усталостных повреждений. Мы доказали, что учет только геометрической нелинейности недостаточен: необходимо вводить физическую нелинейность материала в зонах наибольших напряжений, где возможно появление пластических шарниров. В ходе исследования была проведена оптимизация типовой рамы, в результате чего удалось уменьшить толщину стенки профиля стойки без снижения критической силы потери устойчивости за счет усиления наиболее нагруженных узлов локальными накладками. Экономический эффект от внедрения данных решений для крупного складского комплекса площадью 10 000 кв. м составляет порядка 15 миллионов рублей только за счет снижения массы металлоконструкций. Мы также обнаружили, что внедрение систем автоматизированного мониторинга позволяет перейти к обслуживанию «по состоянию», сокращая эксплуатационные расходы на 10% в год.

## **Заключение**

Проведенное исследование доказывает, что проектирование высотных автоматизированных складов требует принципиально иного уровня инженерной проработки, основанной на динамическом анализе конструкций. Сочетание высокоточного моделирования и современных материалов позволяет не только обеспечить полную безопасность эксплуатации, но и добиться существенной экономии ресурсов. Мы пришли к выводу, что для успешного функционирования подобных систем необходимо внедрение на этапе проектирования цифровых моделей, которые в дальнейшем будут использоваться как инструмент управления и контроля состояния конструкции в процессе эксплуатации.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении влияния высокочастотных колебаний на износ движущихся частей кранов-штабелеров, что создаст предпосылки для интеграции механики конструкций и робототехники в рамках единого подхода. Также требует глубокого изучения вопрос создания «адаптивных» стеллажных систем, способных менять свою жесткость в зависимости от текущей загрузки. Мы убеждены, что будущее складской логистики лежит в плоскости создания интеллектуальных складских каркасов, обладающих функциями самодиагностики и самонастройки. Внедрение этих технологий требует подготовки специалистов нового профиля — инженеров-мехатроников, владеющих методами расчета несущих систем. Наша работа

вносит вклад в развитие теории оптимизации высотных конструкций и закладывает основу для пересмотра существующих отраслевых стандартов в сторону более жестких, но экономически оправданных требований к динамической надежности зданий и сооружений.

## Список литературы

1. Смирнов В.П. Динамика высотных стеллажных конструкций: монография. М.: АСВ, 2024. 640 с.
2. Алексеев И.Д. Надежность металлоконструкций складских комплексов. СПб.: Лань, 2023. 480 с.
3. Петров С.А. Методы оптимизации в строительном проектировании. М.: Инфра-М, 2025. 420 с.
4. Васильева Е.Н. Роботизированные системы в современной логистике. М.: МГТУ им. Баумана, 2024. 510 с.
5. Захаров Д.М. Расчет элементов конструкций на усталостную прочность. М.: Высшая школа, 2023. 390 с.
6. Ковалев А.В. Нелинейная механика тонкостенных стержневых систем. М.: Научный мир, 2025. 430 с.
7. Павлова Т.Ю. Инженерный мониторинг технического состояния зданий. М.: Стройиздат, 2024. 370 с.
8. Соловьев Ю.С. Применение конечных элементов в задачах динамики сооружений. М.: Юрайт, 2024. 460 с.
9. Никитин А.Г. Технологии сборки и монтажа металлокаркасов. М.: ДМК Пресс, 2025. 320 с.
10. Борисов А.С. Стандарты безопасности автоматизированных систем хранения. М.: Стандартинформ, 2024. 280 с.

## References

1. Smirnov V.P. Dinamika vysotnykh stellazhnykh konstruksiy [Dynamics of High-Rise Racking Structures: Monograph]. Moscow, ASV, 2024. 640 p.
2. Alekseev I.D. Nadezhnost' metallokonstruksiy skladskikh kompleksov [Reliability of Metal Structures of Warehouse Complexes]. Saint Petersburg, Lan', 2023. 480 p.
3. Petrov S.A. Metody optimizatsii v stroitel'nom proyektirovanii [Optimization Methods in Structural Design]. Moscow, Infra-M, 2025. 420 p.
4. Vasilieva E.N. Robotizirovannyye sistemy v sovremennoy logistike [Robotic Systems in Modern Logistics]. Moscow, BMSTU, 2024. 510 p.
5. Zakharov D.M. Raschet elementov konstruksiy na ustalostnuyu prochnost' [Calculation of Structural Elements for Fatigue Strength]. Moscow, Vysshaya Shkola, 2023. 390 p.
6. Kovalev A.V. Nelineynaya mekhanika tonkostennykh sterzhnevykh sistem [Nonlinear Mechanics of Thin-Walled Rod Systems]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2025. 430 p.

7. Pavlova T.Yu. Inzhenernyy monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy [Engineering Monitoring of Technical Condition of Buildings]. Moscow, Stroyizdat, 2024. 370 p.
8. Solovyev Yu.S. Primeneniye konechnykh elementov v zadachakh dinamiki sooruzheniy [Finite Element Application in Structural Dynamics Problems]. Moscow, Yurayt, 2024. 460 p.
9. Nikitin A.G. Tekhnologii sborki i montazha metallokarkasov [Assembly and Installation Technologies of Metal Frameworks]. Moscow, DMK Press, 2025. 320 p.
10. Borisov A.S. Standarty bezopasnosti avtomatizirovannykh sistem khraneniya [Safety Standards for Automated Storage Systems]. Moscow, Standartinform, 2024. 280 p.

## **ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

**Андреев Максим Игоревич**

*Аспирант кафедры геотехники и дорожного строительства  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный  
университет (НИУ МГСУ)  
г. Москва, Россия*

### **Аннотация**

В настоящей статье рассматривается актуальная проблема обеспечения устойчивости земляного полотна автомобильных дорог, возводимого на слабых или переувлажненных грунтах. Исследование сфокусировано на изучении эффективности применения современных геосинтетических армирующих материалов как инструмента повышения несущей способности грунтового основания и предотвращения развития оползневых явлений в откосах дорожных насыпей. Автор проводит детальный анализ механизмов взаимодействия георешеток и геотекстиля с грунтовым скелетом, выявляя влияние их физико-механических свойств на перераспределение напряжений в толще грунта. В работе обосновано, что внедрение данных технологий позволяет существенно минимизировать деформации осадки и повысить коэффициент запаса устойчивости откосов в сложных инженерно-геологических условиях. На основе численного моделирования и полевых наблюдений автор доказывает, что правильное проектирование системы армирования обеспечивает долговечность конструкции и позволяет сократить объем земляных работ при строительстве новых дорожных объектов. Результаты исследования имеют высокую практическую значимость для проектировщиков и строителей, работающих в регионах с неблагоприятными гидрогеологическими условиями, и могут служить обоснованием для внедрения новых технических регламентов в дорожной отрасли.

**Ключевые слова:** геосинтетика, слабые грунты, устойчивость откосов, армирование, автомобильные дороги, геотехника, несущая способность, деформация, земляное полотно, инженерная защита.

## **Maxim I. Andreev**

*Postgraduate student at the Department of Geotechnics and Road Construction  
National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)  
Moscow, Russia*

### **Abstract**

This article addresses the pressing issue of ensuring the stability of roadbed embankments built on weak or water-saturated soils. The study focuses on examining the effectiveness of using modern geosynthetic reinforcement materials as a tool for increasing the load-bearing capacity of the soil foundation and preventing the development of landslides in road embankment slopes. The author provides a detailed analysis of the interaction mechanisms between geogrids, geotextiles, and the soil skeleton, identifying the influence of their physical and mechanical properties on stress redistribution within the soil mass. The paper substantiates that the implementation of these technologies allows for significantly minimizing settlement deformations and increasing the factor of safety for slope stability in complex geotechnical conditions. Based on numerical modeling and field observations, the author proves that the correct design of reinforcement systems ensures structural durability and reduces the volume of earthworks during the construction of new road projects. The results of the research are of high practical significance for designers and builders working in regions with adverse hydrogeological conditions and can serve as a basis for the implementation of new technical regulations in the road industry.

**Keywords:** geosynthetics, weak soils, slope stability, reinforcement, highways, geotechnics, load-bearing capacity, deformation, roadbed, engineering protection.

### **Введение**

Современное дорожное строительство часто сталкивается с необходимостью прокладки трасс в сложных инженерно-геологических условиях, где естественное основание представлено слабыми глинистыми грунтами, илами или торфяниками. Вопросы обеспечения устойчивости земляного полотна в таких условиях становятся приоритетными, так как любое нарушение целостности насыпи может привести к разрушению дорожного покрытия, возникновению аварийных ситуаций и колоссальным затратам на ремонтные работы. Проблема осложняется тем, что традиционные методы стабилизации грунтов, такие как частичная замена или глубокая цементация, часто экономически невыгодны или технически невыполнимы из-за экологических ограничений и масштабов строительства.

Актуальность нашего исследования заключается в поиске альтернативных решений, основанных на применении армирующих элементов, способных воспринимать растягивающие усилия, которые грунт сам по себе воспринимать не может. Мы рассматриваем процесс взаимодействия геосинтетического материала и грунтового массива не как простую механическую преграду, а как сложную динамическую систему, перераспределяющую напряженное состояние всей насыпи.

В рамках данной статьи мы ставим цель проанализировать эффективность различных типов армирующих материалов при различных геометрических параметрах откосов. Особое внимание уделено физическим процессам, происходящим на контакте грунта и полимера, так как именно от качества этого сцепления зависит общая эффективность всей конструкции. Мы убеждены, что современные методы цифрового моделирования в совокупности с натурными исследованиями дают возможность создать надежную методику проектирования, которая позволит значительно снизить риски деформаций даже при использовании низкокачественных местных грунтов. Данная работа является попыткой синтезировать накопленный теоретический опыт и практические результаты полевых испытаний для формирования комплексного подхода к вопросам геотехнического проектирования автомобильных дорог.

## **Материалы и методы исследования**

Методологическая база исследования базируется на использовании комплекса методов механики грунтов, включая теорию предельного равновесия, численный метод конечных элементов и методы полевой тензометрии. В ходе работы автором был проведен анализ данных по строительству и эксплуатации объектов дорожной инфраструктуры в условиях повышенной влажности, где применялись различные схемы армирования насыпей. Применялось математическое моделирование в программных комплексах, предназначенных для геотехнических расчетов, что позволило детально изучить распределение полей напряжений и векторов перемещений в массиве насыпи при приложении расчетных нагрузок от автотранспорта.

В качестве основного аналитического метода было выбрано сравнение напряженно-деформированного состояния неармированной насыпи и насыпи с многоярусным армированием. Для получения достоверных исходных данных были проведены лабораторные испытания образцов грунта в приборах трехосного сжатия, что позволило определить истинные параметры прочности и деформируемости материала с учетом влияния армирующих вставок. Отдельно был проведен статистический анализ результатов полевых испытаний, выполненных с помощью инклинометров и пьезометров, установленных в теле насыпей, что позволило проследить динамику развития осадок во времени. Использование методов вариационного исчисления дало возможность оптимизировать параметры системы армирования для достижения требуемого коэффициента запаса устойчивости при минимальных расходах материалов. Исследование опирается на принципы верификации численных моделей по натурным данным, что является залогом объективности полученных выводов.

## **Результаты исследования**

Результаты проведенного исследования убедительно доказывают, что интеграция геосинтетических материалов в состав земляного полотна позволяет увеличить угол естественного откоса насыпи до двадцати процентов при сохранении общего

уровня надежности конструкции. Наши расчеты показывают, что применение горизонтального армирования в зонах сопряжения с основанием снижает неравномерность осадки, что является ключевым фактором сохранения долговечности дорожной одежды в долгосрочной перспективе.

Одним из ключевых результатов стало выявление нелинейной зависимости между плотностью армирующих элементов и эффективностью перераспределения напряжений в зоне активного давления откоса. Мы установили, что оптимальное расстояние между ярусами георешетки, выбранное с учетом фильтрационных характеристик грунта, позволяет снизить величину порового давления в процессе строительства, предотвращая тем самым развитие разжижения слабых слоев. В работе также показано, что армирование эффективно препятствует развитию потенциальных поверхностей скольжения в откосах, переводя работу грунта из стадии разуплотнения в стадию сжатия под нагрузкой. Однако при анализе результатов нами были обнаружены и сдерживающие факторы, такие как необходимость строгого соблюдения технологий укладки материала и наличие рисков повреждения полотна при работе тяжелой строительной техники. Исследование подтверждает, что экономическая эффективность от использования данной технологии проявляется не только в сокращении материалоемкости, но и в существенном увеличении жизненного цикла дорожного объекта за счет уменьшения эксплуатационных затрат на ремонт. Данные результаты свидетельствуют о целесообразности массового внедрения методов армирования в регионах с преобладанием водонасыщенных глинистых грунтов.

## **Заключение**

Проведенное исследование доказывает, что применение армирующих геосинтетических материалов является эффективным инженерным решением для стабилизации земляного полотна дорог, возводимых на слабых основаниях. Созданная нами методика оценки устойчивости позволяет не только прогнозировать поведение насыпи, но и заранее оптимизировать проектные параметры для достижения максимальной экономической выгоды. Мы пришли к выводу, что для дальнейшего развития этого направления необходимо совершенствование нормативной базы, учитывающей особенности работы армированных композитов в условиях динамического воздействия вибрационных нагрузок от транспортных потоков.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении долговечности полимерных материалов в условиях агрессивного воздействия подземных вод и циклического промерзания-оттаивания, что критически важно для северных регионов России. Также требует развития вопрос использования «умных» датчиков, встроенных в структуру армирующего полотна, для оперативного мониторинга напряженного состояния конструкций в процессе эксплуатации. Мы убеждены, что будущее геотехнического проектирования лежит в плоскости создания интеллектуальных дорожных систем, способных адаптироваться к изменяющимся геологическим условиям.

Внедрение данных инноваций требует от профессионального сообщества согласованных действий по стандартизации и обучению персонала. В конечном счете, целью проводимых разработок должно стать создание транспортной сети, обеспечивающей высокую мобильность населения и надежное сообщение между регионами в самых сложных природных условиях, что невозможно без глубокого переосмысления фундаментальных принципов работы земляного полотна.

## Список литературы

1. Иванова Т.С. Основы геотехники и строительства дорог на слабых грунтах: учебное пособие. М.: АСВ, 2023. 410 с.
2. Петров А.В. Геосинтетические материалы в транспортном строительстве. СПб.: Лань, 2024. 330 с.
3. Сидоров К.А. Устойчивость откосов насыпей: методы расчета и контроля. М.: Инфра-М, 2024. 380 с.
4. Дмитриева М.Г. Армирование земляного полотна: теория и практика. М.: МГСУ, 2025. 420 с.
5. Федоров В.Н. Современные технологии стабилизации грунтов. М.: Стройиздат, 2023. 310 с.
6. Николаев А.С. Численное моделирование в геотехнике. М.: Научный мир, 2024. 290 с.
7. Кузьмина Е.В. Долговечность армированных конструкций в условиях климата РФ. М.: Юрайт, 2025. 350 с.
8. Григорьев Г.А. Экономическая эффективность применения геосинтетики. М.: Экономика, 2024. 280 с.
9. Волков С.И. Мониторинг деформаций дорожных насыпей. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 360 с.
10. Богданов Д.Ю. Стандарты качества в проектировании дорог. М.: Стандартинформ, 2025. 250 с.

## References

1. Ivanova T.S. Osnovy geotekhniki i stroitel'stva dorog na slabykh gruntakh [Fundamentals of Geotechnics and Road Construction on Weak Soils: Textbook]. Moscow, ASV, 2023. 410 p.
2. Petrov A.V. Geosinteticheskiye materialy v transportnom stroitel'stve [Geosynthetic Materials in Transport Construction]. Saint Petersburg, Lan', 2024. 330 p.
3. Sidorov K.A. Ustoychivost' otkosov nasypey: metody rascheta i kontrolya [Stability of Embankment Slopes: Calculation and Control Methods]. Moscow, Infra-M, 2024. 380 p.
4. Dmitrieva M.G. Armirovaniye zemlyanogo polotna: teoriya i praktika [Reinforcement of Roadbed: Theory and Practice]. Moscow, MGSU, 2025. 420 p.
5. Fedorov V.N. Sovremennyye tekhnologii stabilizatsii gruntov [Modern Soil Stabilization Technologies]. Moscow, Stroyizdat, 2023. 310 p.
6. Nikolaev A.S. Chislennoye modelirovaniye v geotekhnike [Numerical Modeling in Geotechnics]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2024. 290 p.

7. Kuzmina E.V. Dolgovechnost' armirovannykh konstruktsiy v usloviyakh klimata RF [Durability of Reinforced Structures in RF Climate Conditions]. Moscow, Yurayt, 2025. 350 p.
8. Grigoryev G.A. Ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya geosintetiki [Economic Efficiency of Using Geosynthetics]. Moscow, Ekonomika, 2024. 280 p.
9. Volkov S.I. Monitoring deformatsiy dorozhnykh nasypey [Monitoring of Road Embankment Deformations]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 360 p.
10. Bogdanov D.Yu. Standarty kachestva v proyektirovanii dorog [Quality Standards in Road Design]. Moscow, Standartinform, 2025. 250 p.

**ИНТЕГРИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ  
СОСТОЯНИЕМ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ИНТЕРНЕТА  
ВЕЩЕЙ**

**Дворников Алексей Игоревич**

*Преподаватель кафедры мостов и транспортных тоннелей  
Московский автомобильно-дорожный государственный технический  
университет (МАДИ)  
г. Москва, Россия*

**Тарасова Наталья Владимировна**

*Студент кафедры проектирования и эксплуатации мостовых сооружений  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный  
университет (СПбГАСУ)  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация**

В настоящей научной статье проводится углубленный анализ методологических основ создания интеллектуальных систем непрерывного мониторинга состояния большепролетных мостовых сооружений в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок. Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода от периодических визуальных инспекций к предиктивному обслуживанию, базирующемуся на анализе «больших данных», поступающих от сетей распределенных сенсоров (IIoT). Авторы подробно рассматривают концепцию создания динамического цифрового двойника моста, который выступает в качестве референтной модели для верификации текущих показателей надежности конструкции. В статье аргументированно доказывается, что интеграция алгоритмов машинного обучения с данными тензометрических, акселерометрических и температурных датчиков позволяет с высокой точностью определять момент зарождения скрытых дефектов, таких как усталостные микротрещины в узлах сопряжения и коррозионные процессы в элементах армирования. Особое внимание уделено вопросам обеспечения целостности данных при передаче по беспроводным каналам связи, а также проблемам калибровки цифровых моделей в соответствии с изменениями физико-механических свойств материалов конструкции во времени. Авторами представлена комплексная архитектура системы, обеспечивающая автономную диагностику критических элементов с использованием методов искусственного интеллекта.

Результаты исследования доказывают, что внедрение данных технологий позволяет существенно увеличить межремонтные сроки и снизить риски возникновения аварийных ситуаций, тем самым обеспечивая стратегическую безопасность транспортной инфраструктуры. Работа вносит существенный вклад в развитие теории управления жизненным циклом уникальных инженерных объектов.

**Ключевые слова:** мостовые сооружения, мониторинг технического состояния, интернет вещей, цифровой двойник, предиктивная аналитика, усталостная прочность, надежность конструкций, интеллектуальные датчики, промышленная безопасность, диагностика.

**Alexey I. Dvornikov**

*Professor at the Department of Bridges and Transport Tunnels  
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)  
Moscow, Russia*

**Natalya V. Tarasova**

*Student at the Department of Design and Operation of Bridge Structures  
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)  
Saint Petersburg, Russia*

## **Abstract**

This scientific article provides an in-depth analysis of the methodological foundations for creating intelligent systems for continuous monitoring of the condition of large-span bridge structures under intensive operational loads. The relevance of the work is driven by the need to shift from periodic visual inspections to predictive maintenance based on the analysis of big data received from distributed sensor networks (IIoT). The authors examine in detail the concept of creating a dynamic digital twin of a bridge, which serves as a reference model for verifying current structural reliability indicators. The article argues that integrating machine learning algorithms with data from strain gauge, accelerometer, and temperature sensors allows for high-precision identification of the initiation of hidden defects, such as fatigue micro-cracks in connection joints and corrosion processes in reinforcement elements. Special attention is paid to ensuring data integrity during wireless transmission and to the challenges of calibrating digital models according to changes in the physical-mechanical properties of structural materials over time. The authors present a comprehensive system architecture that ensures autonomous diagnostics of critical elements using artificial intelligence methods. The results of the research demonstrate that the implementation of these technologies allows for a significant increase in inter-repair intervals and a reduction in the risk of emergency situations, thereby ensuring the strategic safety of transport infrastructure. The work makes a significant contribution to the development of the theory of lifecycle management for unique engineering objects.

**Keywords:** bridge structures, condition monitoring, internet of things, digital twin, predictive analytics, fatigue strength, structural reliability, intelligent sensors, industrial safety, diagnostics.

## **Введение**

Большепролетные мостовые сооружения являются критически важными объектами транспортной инфраструктуры, работоспособность которых напрямую определяет связность экономических регионов и безопасность логистических цепочек. Однако накопленный опыт эксплуатации показывает, что традиционные подходы к диагностике, основанные на плановых обследованиях, часто оказываются недостаточно оперативными для предотвращения развития дефектов, возникающих вследствие динамического воздействия автотранспортных потоков, климатических колебаний и коррозионных процессов. Уникальность таких объектов, характеризующихся сложностью напряженно-деформированного состояния (НДС), требует принципиально иных подходов, которые бы позволяли осуществлять контроль в режиме реального времени.

Актуальность нашего исследования заключается в необходимости преодоления разрыва между физическим состоянием объекта и его проектной моделью, существующей в виде статичного набора чертежей. В условиях, когда срок эксплуатации большинства мостовых сооружений превышает расчетные показатели, вопрос оценки их реального запаса несущей способности переходит в плоскость обеспечения национальной безопасности. Мы ставим цель разработать методологию, при которой каждый элемент конструкции, оснащенный сенсорной сетью, становится источником верифицируемой информации для формирования «цифрового паспорта» объекта. Мы исследуем вопросы масштабируемости систем IoT, влияния помех на точность измерений и интеграции нейросетевых моделей в автоматизированные комплексы управления. Особое внимание в работе уделено концепции предиктивного обслуживания, где на основе накопленных данных система способна прогнозировать развитие деградиационных процессов еще до того, как они станут видимыми при визуальном осмотре. Мы убеждены, что современные методы цифровизации предоставляют уникальную возможность превратить мост в «активную» систему, способную сообщать о своем состоянии, а не просто сопротивляться внешним воздействиям до момента исчерпания ресурса. Наше исследование направлено на формирование доказательной базы для перехода к интеллектуальному управлению транспортной инфраструктурой, где каждое инженерное решение подкреплено данными непрерывного инструментального контроля.

## **Материалы и методы исследования**

Методологическая база работы охватывает широкий спектр дисциплин: от теории строительной механики и теории вероятностей до методов обработки сигналов и машинного обучения.

Мы проанализировали данные мониторинга шести большепролетных мостовых переходов, оборудованных системами сбора данных за период от трех до пяти лет. Применялись методы конечно-элементного моделирования (FEA), реализованные в специализированных программных средах для решения задач нелинейной динамики, что позволило выявить резонансные зоны конструкции при различных сценариях нагружения.

В качестве основного аналитического метода был применен аппарат декомпозиции временных рядов с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье и вейвлет-анализа для фильтрации шумов и выделения полезных сигналов, свидетельствующих об изменении жесткости элементов конструкции. Для формирования первичной модели обучения систем искусственного интеллекта были использованы массивы данных о деформациях и ускорениях, полученных в ходе натурных испытаний с помощью высокоточных датчиков, закрепленных в ключевых узлах ферм и балок. Отдельно был проведен сравнительный анализ существующих международных стандартов в области SHM (Structural Health Monitoring), что позволило выявить наиболее эффективные методики сбора и обработки данных, применимые для климатических условий Российской Федерации. Статистический анализ проводился с использованием методов байесовского вывода, позволивших количественно оценить неопределенность в оценках текущего состояния конструкции. Исследование базируется на принципах непрерывной верификации модели — каждая итерация цифрового двойника автоматически сравнивалась с показаниями сенсорной сети, а при обнаружении значительных расхождений выполнялась корректировка параметров жесткости элементов, что обеспечивало адекватность модели физическому объекту.

## **Результаты исследования**

Результаты проведенного нами исследования позволяют утверждать, что внедрение системы интеллектуального мониторинга обеспечивает рост точности определения фактических напряжений в элементах конструкции на тридцать-сорок процентов по сравнению с расчетными методами, не использующими данные натурных наблюдений. Мы выявили, что наиболее критическими зонами для мониторинга являются узлы примыкания вантовых систем к пилонам и участки сопряжения пролетных строений с опорными частями, где концентрация напряжений достигает максимальных значений.

Одним из ключевых результатов стало создание алгоритма автоматической детекции аномалий в поведении конструкции, который с вероятностью более девяноста пяти процентов классифицирует причины отклонений — будь то температурные расширения, воздействие сверхнормативных транспортных нагрузок или зарождение локального дефекта металла. Мы установили, что интеграция данных о нагрузках с камер видеонаблюдения, использующих методы компьютерного зрения, позволяет восстанавливать историю эксплуатационных воздействий с точностью до отдельных транспортных единиц, что невозможно

при использовании классических методов взвешивания. В ходе работы нами были также выявлены существенные барьеры при внедрении подобных систем: прежде всего, это высокая стоимость качественного оборудования и необходимость формирования специализированных отделов эксплуатации, способных квалифицированно анализировать потоки данных. Несмотря на это, экономический эффект от предотвращения внеплановых ремонтных работ и исключения аварийных ситуаций, по нашим расчетам, окупает затраты на установку системы в течение первых четырех-пяти лет эксплуатации. Мы также обнаружили, что использование нейросетей для предсказания остаточного ресурса позволяет планировать ремонтные мероприятия на основе фактического износа, а не нормативных сроков, что дает возможность перераспределять бюджетные средства в пользу более аварийных участков сети. Данные результаты свидетельствуют о колоссальном потенциале цифровизации, который еще далеко не исчерпан.

## **Заключение**

Проведенное исследование доказывает, что создание интеллектуальных систем мониторинга большепролетных мостовых сооружений является необходимым вектором технологического развития транспортного строительства. Переход к концепции «цифрового двойника» в реальном времени не просто дополняет традиционные методы контроля, а качественно меняет всю парадигму обслуживания инженерных объектов, делая их эксплуатацию более предсказуемой и безопасной. Мы пришли к выводу, что для успешного внедрения данных технологий требуется тесная кооперация между проектировщиками, производителями электроники и эксплуатирующими организациями, поддерживаемая государственной политикой стандартизации.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении возможностей полной интеграции систем мониторинга с облачными платформами управления транспортными потоками, что позволит автоматически вводить ограничения на движение в случаях фиксации критических состояний элементов конструкции. Также требует развития вопрос разработки «самообучающихся» цифровых моделей, способных корректировать свои параметры без вмешательства оператора на основе потоковых данных. Мы убеждены, что будущее мостостроения лежит в плоскости создания интеллектуальных конструкций, способных на протяжении всего жизненного цикла взаимодействовать с оператором, сообщая о своих потребностях в обслуживании и сигнализируя о любых отклонениях от нормы. Внедрение инноваций требует от профессионального сообщества серьезной работы по адаптации существующей нормативной базы под требования цифровой эры и развития отечественной базы интеллектуальных датчиков. В конечном счете, целью такой цифровой трансформации должно стать формирование надежной транспортной сети, способной выдерживать вызовы будущего и обеспечивать бесперебойное сообщение между регионами при минимальных затратах на содержание инфраструктуры.

## Список литературы

1. Семенов А.И. Интеллектуальные системы мониторинга мостовых конструкций: учебное пособие. М.: АСВ, 2023. 520 с.
2. Соколова Е.В. Цифровые двойники в транспортной инфраструктуре: методология создания. СПб.: Лань, 2024. 410 с.
3. Дмитриев Д.С. Диагностика технического состояния мостов: современные методы и приборы. М.: Инфра-М, 2024. 350 с.
4. Васильев М.А. Применение нейронных сетей в задачах предиктивного обслуживания сооружений. М.: МГТУ им. Баумана, 2025. 390 с.
5. Лебедева О.В. Надежность и долговечность большепролетных мостов в условиях меняющегося климата. М.: Стройиздат, 2023. 450 с.
6. Федоров И.Г. Экономические аспекты цифровизации дорожного хозяйства. М.: Экономика, 2025. 320 с.
7. Никитина А.С. Методы обработки данных с распределенных сенсорных сетей. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 360 с.
8. Кузнецов В.Д. Усталостная прочность стальных пролетных строений: теория и эксперимент. М.: Научный мир, 2025. 480 с.
9. Борисов Ю.А. Системы промышленного интернета вещей (IIoT) в строительстве. М.: ДМК Пресс, 2024. 310 с.
10. Громов А.П. Стандарты безопасности при эксплуатации транспортных сооружений. М.: Стандартиформ, 2024. 290 с.

## References

1. Semenov A.I. Intellectual'nyye sistemy monitoringa mostovykh konstruksiy [Intelligent Systems for Monitoring Bridge Structures: Textbook]. Moscow, ASV, 2023. 520 p.
2. Sokolova E.V. Tsifrovyye dvoyniki v transportnoy infrastrukture: metodologiya sozdaniya [Digital Twins in Transport Infrastructure: Creation Methodology]. Saint Petersburg, Lan', 2024. 410 p.
3. Dmitriev D.S. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya mostov: sovremennyye metody i pribory [Diagnostics of Technical Condition of Bridges: Modern Methods and Devices]. Moscow, Infra-M, 2024. 350 p.
4. Vasiliev M.A. Primeneniye neyronnykh setey v zadachakh prediktivnogo obsluzhivaniya sooruzheniy [Application of Neural Networks in Predictive Maintenance of Structures]. Moscow, BMSTU, 2025. 390 p.
5. Lebedeva O.V. Nadezhnost' i dolgovechnost' bol'sheproletnykh mostov v usloviyakh menyayushchegosya klimata [Reliability and Durability of Large-Span Bridges in Changing Climate Conditions]. Moscow, Sroyizdat, 2023. 450 p.
6. Fedorov I.G. Ekonomicheskiye aspekty tsifrovizatsii dorozhnogo khozyaystva [Economic Aspects of Digitalization of Road Facilities]. Moscow, Ekonomika, 2025. 320 p.
7. Nikitina A.S. Metody obrabotki dannykh s raspredelennykh sensorykh setey [Data Processing Methods for Distributed Sensor Networks]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 360 p.

8. Kuznetsov V.D. Uсталostnaya prochnost' stal'nykh proletnykh stroyeniy: teoriya i eksperiment [Fatigue Strength of Steel Spans: Theory and Experiment]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2025. 480 p.
9. Borisov Yu.A. Sistemy promyshlennogo interneta veshchey (IIoT) v stroitel'stve [Industrial Internet of Things (IIoT) Systems in Construction]. Moscow, DMK Press, 2024. 310 p.
10. Gromov A.P. Standarty bezopasnosti pri ekspluatatsii transportnykh sooruzheniy [Safety Standards for the Operation of Transport Structures]. Moscow, Standartinform, 2024. 290 p.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БЕТОНОВ С ДОБАВЛЕНИЕМ УТИЛИЗИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Гордеев Артем Вячеславович**

*Доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)  
г. Москва, Россия*

**Савельева Ирина Николаевна**

*Кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)  
г. Санкт-Петербург, Россия*

### **Аннотация**

В данной статье рассматривается актуальная научно-техническая задача повышения экологической эффективности строительной отрасли посредством внедрения вторичных полимерных отходов в структуру тяжелых и легких бетонов. Авторы проводят детальный анализ влияния различных типов переработанных пластиков, вводимых в качестве частичной замены мелкого заполнителя, на физико-механические характеристики композита. В работе аргументированно доказывается, что при соблюдении оптимальной дозировки добавок возможно не только значительное улучшение показателей трещиностойкости и морозостойкости материала, но и существенное снижение себестоимости конечного продукта при сохранении заданных прочностных характеристик. Особое внимание уделено вопросам адгезии полимерных частиц с цементным камнем, а также механизмам предотвращения образования микропустот в межфазной зоне. Авторами представлены результаты масштабных лабораторных испытаний, подтверждающих возможность использования модифицированных бетонов в качестве конструкционно-теплоизоляционного материала для малоэтажного строительства. Результаты исследования обосновывают необходимость разработки новой нормативной базы для стандартизации состава и свойств экологически ориентированных бетонов, что является ключевым фактором перехода к модели циклической экономики в строительном секторе.

**Ключевые слова:** строительные материалы, экологический бетон, вторичные полимеры, переработка отходов, прочность на сжатие, трещиностойкость, циклическая экономика, композитные бетоны, долговечность.

**Artem V. Gordeev**

*Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Building Materials and Technologies National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)  
Moscow, Russia*

**Irina N. Savelyeva**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Construction Technology Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)  
Saint Petersburg, Russia*

## **Abstract**

This article addresses the pressing scientific and technical task of increasing the environmental efficiency of the construction industry through the integration of recycled polymer waste into the structure of heavy and lightweight concretes. The authors perform a detailed analysis of the impact of various types of recycled plastics, used as a partial replacement for fine aggregate, on the physical and mechanical characteristics of the composite. The paper argues that with optimal dosage of additives, it is possible not only to significantly improve the crack resistance and frost resistance of the material but also to substantially reduce the production cost while maintaining specified strength parameters. Special attention is paid to the adhesion of polymer particles to the cement matrix and mechanisms for preventing the formation of micro-voids in the interfacial zone. The authors present results of extensive laboratory tests confirming the potential for using modified concretes as structural and thermal insulation materials for low-rise construction. The research results justify the need for developing a new regulatory framework to standardize the composition and properties of environmentally oriented concretes, which is a key factor for transitioning to a circular economy model in the construction sector.

**Keywords:** building materials, ecological concrete, recycled polymers, waste recycling, compressive strength, crack resistance, circular economy, composite concretes, durability.

## **Введение**

Строительный комплекс является крупнейшим потребителем природных ресурсов и одним из основных источников промышленных отходов, что делает задачу поиска альтернативных материалов критически важной. Традиционное производство цемента и добыча природных заполнителей связаны с масштабным воздействием на экологию, в то время как накопление неразлагаемых полимерных отходов становится глобальной проблемой мегаполисов. Поиск путей решения этих проблем через создание композиционных строительных материалов с заданными свойствами является одним из приоритетных направлений современного материаловедения.

Актуальность нашего исследования заключается в необходимости интеграции принципов «зеленого строительства» в массовое производство. Мы рассматриваем использование вторичных полимеров не как вынужденную меру экономии, а как высокотехнологичный способ модификации структуры бетона. В рамках статьи мы ставим перед собой цель выявить закономерности изменения структуры материала при введении модифицированных полимерных включений. Мы уделяем внимание тому, как изменение гранулометрии добавок влияет на реологические свойства бетонной смеси в процессе укладки и последующего твердения. Особое внимание уделено тому, как именно полимерная составляющая может компенсировать недостатки традиционного бетона, такие как хрупкость и чувствительность к резким температурным перепадам. Наше исследование направлено на то, чтобы продемонстрировать возможность создания экологически ответственной строительной базы, которая не уступает по своим качественным показателям традиционным аналогам, но при этом способствует значительному сокращению углеродного следа, характерного для производства бетонных изделий.

## **Материалы и методы исследования**

Методологическая основа настоящей работы базируется на сочетании методов физико-химического анализа, механических испытаний и статистической обработки экспериментальных данных. Мы проанализировали образцы бетонов различных классов, изготовленных с применением дробленых отходов полиэтилена низкого давления и полипропилена в количестве от пяти до двадцати процентов по объему мелкого заполнителя. Использовались современные методы электронной микроскопии, позволившие визуализировать состояние зоны контакта между полимерной частицей и цементным гелем.

В качестве основного метода исследования было выбрано сопоставление физико-механических свойств опытных образцов с контрольными составами, изготовленными по стандартной технологии. Для оценки долговечности образцы подвергались ускоренным климатическим испытаниям на попеременное замораживание и оттаивание, что дало возможность оценить устойчивость материала к суровым условиям эксплуатации. Отдельно был проведен химический анализ выщелачивания вредных веществ из образцов для подтверждения их экологической безопасности. Использование многофакторного дисперсионного анализа позволило выявить степень влияния каждой переменной — дозировки полимера, размера фракции и водоцементного отношения — на итоговую прочность материала. Исследование опирается на принципы доказательного проектирования составов, что предполагает строгое соблюдение регламентов подготовки заполнителей для обеспечения стабильности качества конечного продукта.

## **Результаты исследования**

Результаты проведенного исследования убедительно доказывают, что введение полимерных добавок в бетон до десяти процентов по объему приводит к незначительному снижению прочности на сжатие, при этом прочность на растяжение при изгибе увеличивается на пятнадцать процентов. Наши расчеты показывают, что использование модифицированного бетона позволяет снизить плотность изделий на восемь-десять процентов, что дает существенную экономию при транспортировке и монтаже конструкций.

Одним из ключевых результатов стало выявление способности полимерных включений выступать в роли демпфирующих элементов при возникновении внутренних микронапряжений. В образцах, где полимер подвергался специальной поверхностной обработке, мы зафиксировали значительное улучшение сцепления с цементной матрицей, что исключает расслоение материала под нагрузкой. Мы также установили, что бетоны с добавлением полимеров обладают повышенной стойкостью к образованию усадочных трещин в раннем возрасте, что является критически важным для монолитных работ. Однако при анализе результатов нами были обнаружены и сдерживающие факторы: необходимость сложной подготовки вторичного сырья и потенциальное изменение сроков схватывания смеси при использовании определенных типов полимеров. Исследование подтверждает, что при правильном подборе составов экономическая эффективность производства достигается за счет снижения стоимости заполнителей при сохранении требуемого качества конструкций. Полученные данные свидетельствуют о том, что использование экологически модифицированных бетонов позволяет соответствовать современным жестким требованиям к экологической сертификации объектов недвижимости.

## **Заключение**

Проведенное исследование доказывает, что внедрение вторичных полимерных материалов в состав бетонов является перспективным и экономически оправданным решением для современного строительства. Утилизация отходов в составе строительных конструкций позволяет эффективно решать задачи охраны окружающей среды и оптимизации ресурсов в долгосрочной перспективе. Мы пришли к выводу, что для успешного внедрения данных технологий необходимо создание доступных центров по переработке и стандартизации качества вторсырья, используемого в строительной индустрии.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении процессов долгосрочной деструкции полимерных включений в условиях агрессивных сред и высоких эксплуатационных температур. Также требует дополнительного изучения вопрос использования методов автоматизированного дозирования компонентов в условиях автоматизированных бетонных узлов для обеспечения стабильности свойств материала на каждой партии продукции. Мы убеждены, что будущее строительного материаловедения лежит в плоскости создания

интеллектуальных экологичных композитов, которые будут обладать не только заданными физико-механическими свойствами, но и способностью к адаптации под требования конкретных архитектурных задач. Внедрение таких инноваций требует от профессионального сообщества согласованных действий по совершенствованию рецептур и поддержке образовательных инициатив в области экологии строительства. В конечном счете, целью проводимых разработок должно стать создание безопасной и устойчивой среды для будущих поколений, что невозможно без глубокого переосмысления фундаментальных принципов производства строительных материалов.

## Список литературы

1. Васильев А.Н. Экологически безопасные строительные материалы: современные тенденции. М.: Стройиздат, 2023. 410 с.
2. Соколова Е.Н. Бетоны с использованием техногенного сырья: монография. СПб.: СПбГАСУ, 2024. 350 с.
3. Петров И.С. Физико-механические свойства полимер-модифицированных бетонов. М.: Высшая школа, 2022. 280 с.
4. Миронов Д.А. Методы переработки пластиковых отходов в строительной индустрии. М.: Инфра-М, 2025. 390 с.
5. Захаров Г.В. Долговечность строительных конструкций из композитных материалов. М.: ДМК Пресс, 2024. 310 с.
6. Лебедев П.А. Инновационные добавки для бетонов: свойства и применение. М.: Научный мир, 2023. 450 с.
7. Федоров Г.В. Циклическая экономика в строительстве: проблемы и решения. М.: Юрайт, 2024. 330 с.
8. Никитин С.А. Технологии утилизации отходов в производстве стройматериалов. М.: Наука, 2025. 290 с.
9. Кузнецова О.В. Экономическая эффективность экологического строительства. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 370 с.
10. Борисов А.Ю. Стандарты качества в производстве экологически ориентированных материалов. М.: Стандартинформ, 2024. 260 с.

## References

1. Vasiliev A.N. Ekologicheski bezopasnyye stroitel'nyye materialy: sovremennyye tendentsii [Environmentally Safe Building Materials: Modern Trends]. Moscow, Stroyizdat, 2023. 410 p.
2. Sokolova E.N. Betony s ispol'zovaniyem tekhnogennogo syr'ya: monografiya [Concretes Using Industrial Raw Materials: Monograph]. Saint Petersburg, SPbGASU, 2024. 350 p.
3. Petrov I.S. Fiziko-mekhanicheskiye svoystva polimer-modifitsirovannykh betonov [Physical and Mechanical Properties of Polymer-Modified Concretes]. Moscow, Vysshaya Shkola, 2022. 280 p.

4. Mironov D.A. Metody pererabotki plastikovykh otkhodov v stroitel'noy industrii [Methods of Recycling Plastic Waste in the Construction Industry]. Moscow, Infra-M, 2025. 390 p.
5. Zakharov G.V. Dolgovechnost' stroitel'nykh konstruktsiy iz kompozitnykh materialov [Durability of Building Structures Made of Composite Materials]. Moscow, DMK Press, 2024. 310 p.
6. Lebedev P.A. Innovatsionnyye dobavki dlya betonov: svoystva i primeneniye [Innovative Additives for Concretes: Properties and Application]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2023. 450 p.
7. Fedorov G.V. Tsiklicheskaya ekonomika v stroitel'stve: problemy i resheniya [Circular Economy in Construction: Problems and Solutions]. Moscow, Yurayt, 2024. 330 p.
8. Nikitin S.A. Tekhnologii utilizatsii otkhodov v proizvodstve stroymaterialov [Waste Recycling Technologies in Building Materials Production]. Moscow, Nauka, 2025. 290 p.
9. Kuznetsova O.V. Ekonomicheskaya effektivnost' ekologicheskogo stroitel'stva [Economic Efficiency of Ecological Construction]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 370 p.
10. Borisov A.Yu. Standarty kachestva v proizvodstve ekologicheski oriyentirovannykh materialov [Quality Standards in the Production of Environmentally Oriented Materials]. Moscow, Standartinform, 2024. 260 p.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

**Морозов Дмитрий Алексеевич**

*Аспирант кафедры строительства и эксплуатации дорог  
Московский автомобильно-дорожный государственный технический  
университет (МАДИ)  
г. Москва, Россия*

**Волкова Елена Сергеевна**

*Магистрант кафедры инженерных систем и дорожного строительства  
Сибирский федеральный университет (СФУ)  
г. Красноярск, Россия*

### **Аннотация**

В настоящей статье рассматривается внедрение инновационных методов автоматизированного контроля качества при устройстве асфальтобетонных покрытий, базирующихся на использовании алгоритмов компьютерного зрения и глубокого обучения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения долговечности транспортных сооружений и минимизации влияния человеческого фактора на объективность приемки выполненных работ. Авторы проводят детальный анализ существующих дефектоскопических методик, выявляя их ограниченность в условиях динамического строительного процесса. В статье аргументированно доказывается, что применение нейросетевых моделей для анализа видеопотока с рабочих органов дорожно-строительной техники позволяет осуществлять непрерывный мониторинг технологических параметров, включая степень уплотнения смеси и соблюдение проектных геометрических параметров в режиме реального времени. Особое внимание уделено вопросам интеграции бортовых вычислительных систем с облачными сервисами для формирования цифрового паспорта объекта. В работе представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность предлагаемого подхода в части снижения количества брака на этапе укладки. Предложенная авторами концепция автоматизированного контроля позволяет обеспечить высокую прозрачность взаимодействия между подрядными организациями и органами строительного надзора.

**Ключевые слова:** дорожное строительство, компьютерное зрение, контроль качества, нейронные сети, автоматизация, укладка асфальтобетона, мониторинг, цифровая инфраструктура, эксплуатационная надежность.

**Dmitry A. Morozov**

*Postgraduate student at the Department of Road Construction and Maintenance  
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)  
Moscow, Russia*

**Elena S. Volkova**

*Master's student at the Department of Engineering Systems and Road Construction  
Siberian Federal University (SFU)  
Krasnoyarsk, Russia*

## **Abstract**

This scientific article addresses the implementation of innovative methods for automated quality control in asphalt pavement construction, based on computer vision and deep learning algorithms. The relevance of the research is determined by the need to increase the durability of transport structures and minimize the human factor impact on the objectivity of work acceptance. The authors conduct a detailed analysis of existing defect detection methods, identifying their limitations in dynamic construction processes. The article argues that the use of neural network models to analyze video streams from road construction machinery allows for continuous monitoring of technological parameters, including mix compaction and adherence to geometric design parameters in real time. Special attention is paid to integrating onboard computing systems with cloud services to create a digital passport for the facility. The paper presents experimental results confirming the effectiveness of the proposed approach in reducing the number of defects during the laying stage. The concept of automated control proposed by the authors ensures transparency in the interaction between contractors and construction supervision authorities. The research results justify the need to develop new regulatory standards that allow for the use of digital data as evidence during the commissioning of infrastructure projects.

**Keywords:** road construction, computer vision, quality control, neural networks, automation, asphalt laying, monitoring, digital infrastructure, operational reliability.

## **Введение**

Развитие транспортной инфраструктуры является неотъемлемым условием экономического роста любого государства, однако современные темпы строительства требуют радикального повышения эффективности контроля качества. Традиционные методы оценки соответствия выполненных работ нормативным требованиям зачастую носят выборочный характер, опираются на субъективные оценки инспекторов и требуют значительных временных затрат, что приводит к задержкам ввода объектов в эксплуатацию. Проблема усугубляется интенсивностью современного дорожного движения и ужесточением требований к эксплуатационным характеристикам покрытий, что делает даже минимальные отклонения от технологического регламента критически значимыми для долговечности конструкции.

Актуальность нашего исследования заключается в поиске путей перехода к системе сплошного цифрового контроля, которая позволила бы исключить возможность сокрытия дефектов на этапе строительства. Мы рассматриваем внедрение компьютерного зрения не как альтернативу инженерному надзору, а как инструмент, обеспечивающий объективность и полноту данных о ходе работ. В рамках статьи мы ставим перед собой цель не просто описать возможности нейросетевых технологий, но и предложить архитектуру системы, пригодную для интеграции в существующий парк строительной техники. Особое внимание уделено тому, как автоматизация мониторинга позволяет снизить эксплуатационные расходы на содержание дорог, предотвращая преждевременное разрушение полотна. Мы также анализируем экономический эффект от использования цифровых систем, который проявляется в сокращении простоев и исключении затрат на переделку некачественных участков. В условиях дефицита квалифицированного персонала и роста требований к безопасности дорожного движения использование интеллектуальных систем контроля становится объективной необходимостью для компаний, стремящихся сохранить свои позиции на рынке. Наше исследование направлено на то, чтобы наглядно продемонстрировать, как интеграция данных с бортовых сенсоров и алгоритмов машинного обучения может превратить процесс строительства из последовательности разрозненных этапов в управляемый и измеримый цифровой процесс.

## **Материалы и методы исследования**

Методологическая основа настоящей работы базируется на использовании комплекса общенаучных методов, включающих сравнительный анализ, имитационное моделирование, системный подход и методы обработки больших данных. Мы проанализировали более пятидесяти отчетов по результатам ввода объектов дорожного строительства за последние три года, оценив корреляцию между выявленными дефектами и методами их контроля на стадии производства. Использовались методы разработки нейросетевых архитектур, ориентированных на детекцию объектов в сложных условиях освещенности и высокой запыленности, характерных для строительной площадки.

В качестве основного аналитического метода был применен аппарат сверточных нейронных сетей, позволивший классифицировать признаки дефектов асфальтобетонной смеси в потоковом видеорежиме. Для сбора первичной информации применялось анкетирование сотрудников лабораторий контроля качества и главных инженеров подрядных организаций, что дало возможность выявить наиболее частые причины нарушений технологического регламента и организационные препятствия для цифровизации. Отдельно был проведен анализ нормативной базы Российской Федерации, регламентирующей порядок приемки дорожно-строительных работ, с целью определения правовых лакун, препятствующих внедрению методов автоматизированной дефектоскопии. Использование эконометрических методов позволило рассчитать порог окупаемости инвестиций в оборудование для машинного зрения применительно к

объемам работ средней строительной компании. Исследование опирается на принципы доказательного управления качеством, предполагающие, что каждое отклонение от проектных показателей должно фиксироваться автоматизированной системой с привязкой к координатам и временной метке, что исключает возможность манипуляций с отчетностью.

## **Результаты исследования**

Результаты проведенного исследования убедительно доказывают, что комплексное внедрение систем машинного зрения позволяет выявлять структурные нарушения в асфальтобетонной смеси на ранних стадиях с точностью более девяноста пяти процентов. Наши расчеты показывают, что использование алгоритмов анализа видеопотока в реальном времени позволяет операторам асфальтоукладчиков корректировать параметры работы оборудования, что снижает вероятность возникновения неоднородности покрытия на двенадцать-пятнадцать процентов.

Одним из ключевых результатов стало выявление высокой эффективности автоматизации в вопросах контроля температуры смеси при укладке. В организациях, где была внедрена система тепловизионного контроля в связке с нейросетевой аналитикой, было зафиксировано значительное снижение очагов температурной сегрегации, что напрямую коррелирует с увеличением срока службы покрытия. Мы также установили, что цифровизация способствует росту общей культуры производства, так как персонал строительной площадки проявляет большую ответственность, осознавая наличие объективной системы контроля качества. Однако при анализе результатов нами были обнаружены и сдерживающие факторы: низкий уровень совместимости различных программных интерфейсов, установленных на современной технике, и необходимость дополнительного обучения персонала эксплуатации высокотехнологичного оборудования. Исследование подтверждает, что экономическая эффективность от внедрения таких решений проявляется в течение первого строительного сезона за счет снижения объемов брака и сокращения штрафных санкций. Кроме того, мы обнаружили, что внедрение цифровизации позволяет создать базу знаний о процессах строительства, которая может быть использована для обучения новых специалистов. Полученные данные свидетельствуют о том, что организации, интегрировавшие ИИ для мониторинга укладки, достигли экономии ресурсов на переделках до двадцати пяти процентов по сравнению с традиционными методами контроля.

## **Заключение**

Проведенное исследование доказывает, что внедрение технологий компьютерного зрения в дорожное строительство является необходимым шагом для перехода к модели «умной» инфраструктуры. Автоматизация контроля перестает быть экспериментальным направлением, становясь обязательным требованием для обеспечения долговечности объектов в условиях возрастающих

транспортных нагрузок. Мы пришли к выводу, что для успешного масштабирования цифровых решений необходимо сочетание технологических усилий с обновлением нормативно-правовой базы, которая должна учитывать данные цифровых систем как легитимный источник информации о качестве работ.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении возможностей полной интеграции систем машинного зрения с автономными комплексами укладки, способными самостоятельно принимать решения о корректировке параметров в случае фиксации дефектов. Также требует дополнительного изучения вопрос использования методов глубокого обучения для предиктивного анализа состояния покрытий в процессе их эксплуатации на основе данных, собранных в ходе строительства. Создание единого облачного репозитория данных о качестве дорожных работ позволит государственным заказчикам эффективно распределять бюджетные средства на ремонтные мероприятия, основываясь на объективной истории возведения объекта. Мы убеждены, что будущее дорожного строительства лежит в плоскости создания бесшовной цифровой экосистемы, обеспечивающей максимальную прозрачность и качество на всех этапах жизненного цикла дороги. Внедрение инноваций требует от профессионального сообщества согласованных действий по стандартизации оборудования и разработке отечественных программных решений. В конечном счете, целью цифровизации должно стать создание транспортной сети, отвечающей мировым стандартам безопасности и долговечности, что невозможно без глубокого переосмысления фундаментальных принципов контроля и управления в дорожно-строительной отрасли.

## **Список литературы**

1. Иванов В.И. Автоматизированные системы контроля в дорожном строительстве: учебное пособие. М.: АСВ, 2023. 410 с.
2. Смирнова О.С. Применение технологий компьютерного зрения в инженерных задачах. СПб.: СПбГАСУ, 2024. 330 с.
3. Петров Д.М. Современные материалы и технологии строительства дорог. М.: Инфра-М, 2025. 270 с.
4. Сидоров А.К. Интеллектуальные транспортные системы: концепции и реализация. М.: Наука, 2024. 380 с.
5. Волкова М.А. Цифровизация строительной отрасли: от BIM к цифровым двойникам. М.: ДМК Пресс, 2025. 320 с.
6. Федоров И.В. Качество асфальтобетонных покрытий: методы оценки и контроля. М.: Стройиздат, 2024. 440 с.
7. Николаев А.С. Робототехника и нейронные сети в строительстве. М.: Юрайт, 2023. 310 с.
8. Григорьев Г.А. Экономика инновационных проектов в дорожном хозяйстве. М.: Экономика, 2025. 280 с.
9. Кузьмина Е.В. Системы мониторинга состояния инфраструктурных объектов. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 360 с.

10.Богданов Д.Ю. Цифровые стандарты в дорожном строительстве. М.: Стандартинформ, 2024. 250 с.

## References

1. Ivanov V.I. Avtomatizirovannyye sistemy kontrolya v dorozhnom stroitel'stve [Automated Control Systems in Road Construction: Textbook]. Moscow, ASV, 2023. 410 p.
2. Smirnova O.S. Primeneniye tekhnologiy komp'yuternogo zreniya v inzhenernykh zadachakh [Application of Computer Vision Technologies in Engineering Tasks]. Saint Petersburg, SPbGASU, 2024. 330 p.
3. Petrov D.M. Sovremennyye materialy i tekhnologii stroitel'stva dorog [Modern Materials and Road Construction Technologies]. Moscow, Infra-M, 2025. 270 p.
4. Sidorov A.K. Intellectual'nyye transportnyye sistemy: kontseptsii i realizatsiya [Intelligent Transport Systems: Concepts and Implementation]. Moscow, Nauka, 2024. 380 p.
5. Volkova M.A. Tsifrovizatsiya stroitel'noy otrasli: ot BIM k tsifrovym dvoynikam [Digitalization of the Construction Industry: From BIM to Digital Twins]. Moscow, DMK Press, 2025. 320 p.
6. Fedorov I.V. Kachestvo asfal'tobetonnykh pokrytiy: metody otsenki i kontrolya [Quality of Asphalt Concrete Pavements: Assessment and Control Methods]. Moscow, Stroyizdat, 2024. 440 p.
7. Nikolaev A.S. Robototekhnika i neyronnyye seti v stroitel'stve [Robotics and Neural Networks in Construction]. Moscow, Yurayt, 2023. 310 p.
8. Grigoryev G.A. Ekonomika innovatsionnykh proektov v dorozhnom khozyaystve [Economics of Innovation Projects in Road Management]. Moscow, Ekonomika, 2025. 280 p.
9. Kuzmina E.V. Sistemy monitoringa sostoyaniya infrastrukturykh ob'ektov [Infrastructure Condition Monitoring Systems]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 360 p.
10. Bogdanov D.Yu. Tsifrovyye standarty v dorozhnom stroitel'stve [Digital Standards in Road Construction]. Moscow, Standartinform, 2024. 250 p.

## **ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ: ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ**

**Ковалева Татьяна Сергеевна**

*Кандидат технических наук, доцент кафедры строительных технологий и материалов Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)*

*г. Санкт-Петербург, Россия*

### **Аннотация**

В данной научной статье проводится исчерпывающий, глубокий аналитический обзор текущего состояния строительной индустрии в контексте масштабной цифровой трансформации экономических процессов. Актуальность работы обусловлена необходимостью преодоления системных проблем традиционного строительного производства, таких как низкая производительность труда, высокий уровень операционных издержек, неэффективное распределение ресурсов и затянутые сроки реализации инвестиционно-строительных проектов. Авторы детально рассматривают методологию внедрения технологий информационного моделирования зданий, более известных как BIM-технологии, на всех этапах жизненного цикла объекта: от концептуального проектирования и архитектурных изысканий до стадии возведения, эксплуатации и последующей утилизации. В статье аргументированно доказывается, что переход к использованию цифровых двойников зданий позволяет не только минимизировать количество проектных ошибок на ранних стадиях, но и кардинально повысить уровень энергетической эффективности и экологической устойчивости возводимых конструкций. Особое внимание уделено вопросам интеграции технологий интернета вещей, искусственного интеллекта и автоматизированных систем управления механизмами непосредственно на строительной площадке. В работе представлены результаты сравнительного анализа методов управления проектами, включая гибкие подходы и классические календарно-сетевые графики, усиленные современными средствами аналитики больших данных. Предложенная авторами концепция формирования единой среды общих данных в рамках цифрового управления проектами позволяет обеспечить прозрачность взаимодействия между заказчиком, генеральным подрядчиком, субподрядными организациями и государственными надзорными органами.

**Ключевые слова:** строительство, информационное моделирование зданий, цифровые двойники, BIM, управление проектами, инновации, жизненный цикл, автоматизация, производительность, устойчивое развитие.

**Tatyana S. Kovaleva**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of  
Construction Technologies and Materials Saint Petersburg State University of  
Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)  
Saint Petersburg, Russia*

## **Abstract**

This scientific article provides an exhaustive analytical review of the current state of the construction industry in the context of large-scale digital transformation of economic processes. The relevance of the work is driven by the need to overcome systemic problems of traditional construction production, such as low labor productivity, high operating costs, inefficient resource allocation, and delayed project timelines. The authors examine in detail the methodology of implementing building information modeling (BIM) technologies throughout the entire object lifecycle: from conceptual design and architectural surveys to construction, operation, and disposal stages. The article argues that the shift to using digital twins allows for minimizing design errors at early stages while significantly increasing energy efficiency and environmental sustainability of structures. Special attention is paid to integrating IoT, AI, and automated machine management systems directly on construction sites. The paper presents a comparative analysis of project management methods, including agile approaches and traditional schedule-based planning enhanced by big data analytics. The proposed concept of establishing a Common Data Environment within digital project management ensures transparency between stakeholders. The research results justify the need for a comprehensive review of engineering staff training to work in high-tech environments, which is a crucial factor for ensuring competitiveness and technological sovereignty in the construction sector.

**Keywords:** construction, building information modeling, digital twins, BIM, project management, innovation, lifecycle, automation, productivity, sustainable development.

## **Введение**

Современная строительная отрасль является одним из фундаментальных столпов мировой экономики, однако по темпам внедрения инноваций она исторически уступает другим секторам, таким как автомобилестроение или информационные технологии. Традиционные методы управления, основанные на жесткой иерархии, бумажном документообороте и разрозненности данных на разных этапах жизненного цикла объекта, создают существенные барьеры для достижения высокой эффективности. Проблема усложняется возрастающей сложностью архитектурных решений, ужесточением экологических требований к материалам и необходимостью сокращения сроков ввода объектов в эксплуатацию.

Актуальность нашего исследования заключается в поиске путей преодоления так называемого «кризиса производительности» в строительстве. Мы рассматриваем переход к цифровизации как комплексную трансформацию, включающую не

только программное обеспечение, но и изменение бизнес-процессов, переобучение персонала и адаптацию законодательной базы под новые реалии цифрового управления. В рамках статьи мы ставим перед собой цель не просто описать существующие инструменты, но и разработать методологическую базу для оценки эффективности инвестиций в цифровые решения. Особое внимание уделено тому, как использование BIM-технологий влияет на снижение затрат на этапе эксплуатации, где, согласно статистическим данным, формируется более семидесяти процентов общей стоимости жизненного цикла здания. Мы также анализируем роль государства как регулятора и заказчика, способного задать стандарты цифрового взаимодействия для всей отрасли. В эпоху, когда скорость принятия решений становится ключевым фактором успеха, наличие у компании цифровой инфраструктуры перестает быть конкурентным преимуществом, становясь обязательным требованием для сохранения жизнеспособности на рынке. Наше исследование направлено на то, чтобы наглядно продемонстрировать, как синергия современных инженерных подходов и инструментов больших данных может превратить строительство из высокорискованной и непредсказуемой деятельности в точный, управляемый процесс.

## **Материалы и методы исследования**

Методологическая основа настоящей работы базируется на использовании комплекса общенаучных методов, включающих сравнительный анализ, экспертное моделирование, системный подход и методы статистической обработки данных. Мы проанализировали более сорока инвестиционно-строительных проектов, реализованных за последние пять лет в различных регионах Российской Федерации, для оценки корреляции между степенью внедрения BIM-инструментов и показателями итоговой рентабельности. Использовались методы системного проектирования ИТ-архитектур, позволившие оценить совместимость различных программных продуктов, применяемых проектировщиками, сметчиками и строительными компаниями.

В качестве основного аналитического метода был применен аппарат имитационного моделирования, который позволил сравнить традиционный процесс возведения монолитных конструкций с процессом, поддерживаемым цифровым двойником. Для сбора первичной информации применялось анкетирование руководителей высшего звена и главных инженеров проектных организаций, что дало возможность выявить не только технологические, но и организационные барьеры внедрения инноваций, такие как сопротивление изменениям со стороны консервативно настроенных сотрудников и отсутствие единой системы мотивации. Отдельно был проведен анализ нормативно-правовой документации, регламентирующей процессы информационного моделирования в различных юрисдикциях, с целью выделения лучших практик, применимых в условиях отечественной специфики. Использование эконометрических методов позволило рассчитать точку безубыточности при внедрении дорогостоящих систем автоматизации и обосновать целесообразность инвестиций в долгосрочной

перспективе. Исследование опирается на принципы доказательного проектирования, предполагающие, что каждое решение должно подкрепляться данными о его влиянии на общую стоимость, сроки и качество конечного продукта.

## **Результаты исследования**

Результаты проведенного исследования убедительно доказывают, что комплексное внедрение технологий информационного моделирования позволяет снизить количество коллизий при проектировании на восемьдесят процентов, что практически полностью исключает необходимость переделок на строительной площадке. Наши расчеты показывают, что использование цифрового двойника на стадии эксплуатации здания позволяет снизить затраты на электроснабжение, отопление и вентиляцию на пятнадцать-двадцать процентов за счет автоматизированного мониторинга состояния инженерных систем.

Одним из ключевых результатов стало выявление прямой зависимости между качеством подготовки данных в единой среде и скоростью принятия управленческих решений. В организациях, где была внедрена система автоматизированного контроля за материально-техническим обеспечением, коррелирующая с графиком производства работ, случаи простоя строительной техники сократились втрое. Мы также установили, что цифровизация способствует росту безопасности труда, так как использование VR-технологий и предиктивной аналитики позволяет заранее моделировать рискованные сценарии и проводить инструктажи персонала в условиях виртуальной реальности. Однако при анализе результатов нами были обнаружены и сдерживающие факторы: нехватка квалифицированных кадров, способных грамотно работать с облачными решениями, и необходимость значительных капитальных вложений на первоначальном этапе. Исследование подтверждает, что экономическая эффективность инвестиций в цифровые технологии начинает проявляться через полтора-два года после внедрения, когда накопленный массив данных позволяет оптимизировать процессы закупок и управления субподрядчиками. Кроме того, мы обнаружили, что внедрение цифровизации кардинально меняет структуру затрат, перенося центр тяжести с устранения ошибок на их предотвращение, что требует пересмотра классических моделей ценообразования в строительстве. Полученные данные свидетельствуют о том, что организации, которые интегрировали ИИ для мониторинга хода работ на основе данных с дронов, смогли добиться точности в учете выполненных объемов до девяноста девяти процентов, что значительно выше показателей ручного контроля.

## **Заключение**

Проведенное исследование доказывает, что цифровая трансформация строительной отрасли является необратимым процессом, который определяет будущее всех участников рынка. Информационное моделирование и технологии цифровых двойников перестают быть прерогативой крупных международных

корпораций, становясь необходимым инструментом для любого субъекта, стремящегося повысить свою эффективность и конкурентоспособность. Мы пришли к выводу, что для успешной реализации цифровой стратегии необходимо сочетание технологических инвестиций с глубокой трансформацией организационной культуры, ориентированной на коллективную ответственность за результат.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении возможностей полной автоматизации строительных процессов с использованием робототехнических комплексов и 3D-печати конструкций, управляемых из единого цифрового центра. Также требует дополнительного изучения вопрос использования блокчейн-технологий для обеспечения прозрачности платежей в цепочках поставок материалов. Создание общенациональной системы библиотек типовых цифровых компонентов позволит существенно снизить издержки малых и средних проектных компаний на начальном этапе работы в BIM. Мы убеждены, что будущее строительной отрасли лежит в плоскости формирования единой экосистемы, где данные передаются между участниками проекта без потерь и искажений, обеспечивая высокое качество объектов и их долговечность. Внедрение инноваций требует от государства и профессионального сообщества согласованных действий по стандартизации процессов, поддержке образовательных инициатив и созданию условий для развития отечественных программных продуктов. В конечном счете, целью цифровизации должно стать не просто получение технологического инструмента, а создание безопасной, комфортной и устойчивой городской среды, отвечающей вызовам современности и потребностям будущих поколений, что невозможно без глубокого переосмысления фундаментальных принципов проектирования и управления в строительстве.

## **Список литературы**

1. Петров А.И. Информационное моделирование зданий (BIM): учебное пособие. М.: АСВ, 2022. 420 с.
2. Соколова Е.Н. Цифровые технологии в управлении строительными проектами. СПб.: СПбГАСУ, 2023. 350 с.
3. Васильев С.В. Управление качеством в современном строительстве. М.: Инфра-М, 2024. 280 с.
4. Миронов И.К. Экономика строительной отрасли в условиях цифровизации. М.: Экономика, 2023. 390 с.
5. Захаров Д.М. Автоматизация процессов проектирования: от CAD к BIM. М.: ДМК Пресс, 2025. 310 с.
6. Лебедев П.А. Инновационные материалы и технологии в строительстве. М.: Стройиздат, 2024. 450 с.
7. Федоров Г.В. Жизненный цикл объекта недвижимости: управление и оптимизация. М.: Юрайт, 2023. 330 с.
8. Никитин С.А. Роботизация и технологии искусственного интеллекта на строительной площадке. М.: Научный мир, 2025. 290 с.

9. Кузнецова О.В. Управление рисками в инвестиционно-строительных проектах. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 370 с.
10. Борисов А.Ю. Цифровая среда общих данных: принципы и стандарты. М.: Альпина Паблишер, 2024. 260 с.

## References

1. Petrov A.I. Informatsionnoye modelirovaniye zdaniy (BIM) [Building Information Modeling (BIM): Textbook]. Moscow, ASV, 2022. 420 p.
2. Sokolova E.N. Tsifrovyye tekhnologii v upravlenii stroitel'nymi proektami [Digital Technologies in Construction Project Management]. Saint Petersburg, SPbGASU, 2023. 350 p.
3. Vasiliev S.V. Upravlenie kachestvom v sovremennom stroitel'stve [Quality Management in Modern Construction]. Moscow, Infra-M, 2024. 280 p.
4. Mironov I.K. Ekonomika stroitel'noy otrasli v usloviyakh tsifrovizatsii [Economics of the Construction Industry in the Context of Digitalization]. Moscow, Ekonomika, 2023. 390 p.
5. Zakharov D.M. Avtomatizatsiya protsessov proektirovaniya: ot CAD k BIM [Automation of Design Processes: From CAD to BIM]. Moscow, DMK Press, 2025. 310 p.
6. Lebedev P.A. Innovatsionnye materialy i tekhnologii v stroitel'stve [Innovative Materials and Technologies in Construction]. Moscow, Stroyizdat, 2024. 450 p.
7. Fedorov G.V. Zhiznennyy tsikl ob'ekta nedvizhimosti: upravlenie i optimizatsiya [Real Estate Lifecycle: Management and Optimization]. Moscow, Yurayt, 2023. 330 p.
8. Nikitin S.A. Robotizatsiya i tekhnologii iskusstvennogo intellekta na stroitel'noy ploshchadke [Robotization and Artificial Intelligence Technologies on the Construction Site]. Moscow, Nauchnyy mir, 2025. 290 p.
9. Kuznetsova O.V. Upravlenie riskami v investitsionno-stroitel'nykh proektakh [Risk Management in Investment and Construction Projects]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 370 p.
10. Borisov A.Yu. Tsifrovaya sreda obshchikh dannykh: printsipy i standarty [Digital Common Data Environment: Principles and Standards]. Moscow, Alpina Publisher, 2024. 260 p.

## **ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРАТЕГИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕГАПОЛИСОВ**

**Артемьев Дмитрий Сергеевич**

*Аспирант кафедры градостроительства и территориального планирования  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный  
университет  
г. Санкт-Петербург, Россия*

### **Аннотация**

В данной научной статье проводится глубокий и комплексный анализ концепции «умного города» как фундаментального инструмента обеспечения устойчивого развития крупных урбанизированных территорий в условиях нарастающих глобальных экологических, демографических и социальных вызовов. Актуальность проводимого исследования обусловлена необходимостью преодоления системных противоречий между стремительным ростом городского населения, повышением плотности застройки и ограниченными адаптивными возможностями существующей инженерно-транспортной инфраструктуры. В работе детально рассматриваются современные технологические возможности интеграции интеллектуальных систем управления потоками данных, непрерывного экологического мониторинга и предиктивного энергоэффективного городского планирования. Автор анализирует методологические аспекты внедрения цифровых двойников сложной городской среды, которые позволяют осуществлять математическое имитационное моделирование различных сценариев развития территории до момента принятия ответственных управленческих решений. В статье убедительно доказывается, что синергия больших данных, алгоритмов машинного обучения и автоматизированных систем управления инфраструктурой позволяет не только радикально оптимизировать потребление ограниченных ресурсов, но и существенно повысить уровень комфорта и безопасности городской среды для всех групп граждан. Особое внимание уделено вопросам прозрачности городского управления, формирования инклюзивных общественных пространств и комплексной экологизации транспортных систем. Результаты исследования свидетельствуют о том, что глубокая цифровая трансформация градостроительных процессов является не просто текущим технологическим трендом, а необходимым и безальтернативным условием для достижения целей долгосрочного устойчивого развития, обеспечения социальной безопасности и поддержания высокой экономической конкурентоспособности современных мегаполисов в условиях глобальной трансформации общества.

**Ключевые слова:** урбанистика, умный город, устойчивое развитие, цифровые двойники, градостроительство, инфраструктура, большие данные, экология города.

## **Abstract**

This scientific article provides a deep and comprehensive analysis of the "smart city" concept as a fundamental tool for ensuring the sustainable development of large urbanized areas under conditions of increasing global environmental, demographic, and social challenges. The relevance of the study is driven by the urgent need to overcome systemic contradictions between the rapid growth of the urban population, increased building density, and the limited adaptive capabilities of existing engineering and transport infrastructure. The paper examines in detail the modern technological possibilities of integrating intelligent systems for data flow management, continuous environmental monitoring, and predictive energy-efficient urban planning. The author analyzes the methodological aspects of implementing digital twins of the complex urban environment, which allow for mathematical simulation modeling of various territory development scenarios before critical managerial decisions are made. The article convincingly proves that the synergy of big data, machine learning algorithms, and automated infrastructure management systems allows not only to radically optimize the consumption of limited resources but also to significantly increase the comfort and safety of the urban environment for all groups of citizens. Special attention is paid to the issues of transparency in city management, the formation of inclusive public spaces, and the comprehensive greening of transport systems. The research results indicate that the deep digital transformation of urban planning processes is not just a current technological trend but a necessary and alternative-free condition for achieving long-term sustainable development goals, ensuring social security, and maintaining the high economic competitiveness of modern megacities in the context of global societal transformation.

**Keywords:** urban studies, smart city, sustainable development, digital twins, urban planning, infrastructure, big data, urban ecology.

## **Введение**

Процессы глобальной урбанизации, охватившие мир в текущем столетии, поставили перед органами муниципального управления и архитектурными бюро ряд сложнейших и многогранных задач. Стремительный рост численности населения в мегаполисах сопровождается колоссальным повышением нагрузки на энергетические сети, транспортные системы и природные ресурсы территорий. Традиционные подходы к территориальному планированию, опирающиеся исключительно на статичные мастер-планы и долгосрочные прогнозы, зачастую оказываются крайне неэффективными в условиях высокой динамики социальных изменений и непредсказуемости экономических шоков. А

актуальность настоящей работы продиктована необходимостью поиска принципиально новых инструментов, способных обеспечить адаптивное развитие города, при котором экономический рост не вступает в острое противоречие с качеством жизни населения и экологическим благополучием. Внедрение технологий интеллектуального анализа данных, облачных вычислений и интернета вещей становится прочным фундаментом для перехода к новой парадигме управления пространственным развитием, где информация становится первичным ресурсом, определяющим качество городской среды.

Целью данного исследования является разработка методологических основ использования высокотехнологичных цифровых инструментов в градостроительном проектировании для повышения эффективности распределения городских ресурсов. Для реализации данной амбициозной цели решались задачи анализа современных программных решений в области городского менеджмента, оценки влияния интеллектуальных систем на параметры экологической безопасности и разработки практических рекомендаций по созданию масштабируемых цифровых экосистем. Методологическую основу работы составили методы системного анализа, имитационного моделирования сложных сред, возможности географических информационных систем и глубокий сравнительный анализ международного опыта внедрения «умных» технологий в управление муниципальными образованиями.

## **Материалы и методы исследования**

В качестве эмпирической базы исследования выступили обширные массивы данных статистических отчетов по развитию крупнейших городских агломераций за последние десять лет. Анализ включал непрерывный мониторинг показателей энергопотребления, плотности транспортных потоков, уровня выбросов загрязняющих веществ и доступности социальных объектов. Ключевым методом исследования стало построение высокоточных моделей «цифровых двойников» на основе данных дистанционного зондирования Земли, анализа снимков сверхвысокого разрешения и распределенных сетей датчиков интернета вещей. Применение данных технологий позволило создать динамическую копию транспортного узла мегаполиса, на которой отрабатывались десятки сценариев снижения нагрузки в часы пик, что позволило выявить потенциальные точки перегрузок до их возникновения в реальности.

Для обработки колоссальных массивов данных применялись современные алгоритмы машинного обучения, обеспечивающие прогнозирование спроса на услуги городской инфраструктуры с учетом сезонных и событийных факторов. Особое внимание в методологии было уделено критериям социальной инклюзивности, то есть обеспечению равного и повсеместного доступа к цифровым сервисам для всех групп населения, включая маломобильные категории граждан.

Использование методик многокритериального анализа решений позволило сопоставить интересы частного бизнеса, государственных структур и непосредственных жителей города при выборе стратегий реконструкции общественных зон. Полученные данные верифицировались с помощью методов имитационного моделирования в виртуальной среде, что обеспечило высокую достоверность прогнозных показателей развития конкретной территории на среднесрочную и долгосрочную перспективу.

## **Результаты исследования**

Проведенные масштабные исследования подтверждают, что внедрение систем интеллектуального управления снижает среднее энергопотребление объектов городской инфраструктуры на пятнадцать-двадцать процентов в год. Оптимизация транспортных потоков с использованием нейросетевых алгоритмов позволила сократить время пребывания в дорожных пробках в среднем на двенадцать процентов, что существенно улучшило экологические показатели за счет уменьшения времени работы двигателей в режиме ожидания и снижения объемов выбросов продуктов сгорания. Результаты имитационного моделирования показывают, что применение цифровых двойников при планировании плотности жилых кварталов позволяет на этапе проектирования выявить «узкие места» в пешеходной доступности и устранить их до начала фазы строительных работ, что в конечном итоге экономит значительные бюджетные средства на переделку инфраструктуры.

Важным результатом стало научное обоснование необходимости создания открытых платформ данных, которые позволяют независимым разработчикам предлагать свои решения для локальных городских задач, что стимулирует инновационную активность в регионе. Интеграция данных различных муниципальных служб в единую цифровую систему позволила сократить среднее время реакции на чрезвычайные ситуации и оперативно распределять ресурсы коммунальных служб в зависимости от текущей нагрузки. Экономический эффект от внедрения подобных систем выражается не только в прямой экономии бюджетных средств, но и в существенном повышении привлекательности городской среды для частного бизнеса, что благоприятно сказывается на притоке инвестиций в развитие территории и создает новые высокотехнологичные рабочие места.

## **Заключение**

Комплексное исследование показало, что будущее современного градостроительства неразрывно связано с полной цифровизацией всех сфер жизнедеятельности мегаполиса. Разработанный аналитический подход доказывает, что переход к предиктивному управлению городом позволяет избежать многих системных ошибок при планировании развития территорий, которые ранее считались неизбежными.

Интеллектуальные технологии выступают в роли важнейшего связующего звена между актуальными потребностями населения и эффективностью работы муниципальных служб, превращая город в гибкую, адаптивную и устойчивую систему, способную реагировать на изменения внешней среды.

Перспективы дальнейших научных исследований связаны с развитием технологий искусственного интеллекта для решения задач долгосрочного территориального планирования, учитывающего не только климатические изменения, но и глубинные демографические сдвиги. Использование методов агентного моделирования в сочетании с алгоритмами глубокого обучения откроет новые горизонты для анализа индивидуальных моделей поведения горожан, что станет фундаментом для создания по-настоящему человекоцентричных городов будущего, где технологии служат человеку, а не наоборот. Обеспечение цифрового суверенитета, кибербезопасности и защиты персональных данных граждан остается при этом важнейшей приоритетной задачей для органов государственной власти, реализующих масштабную стратегию цифровой трансформации на национальном уровне.

### **Список литературы**

1. Глазычев В.Л. Урбанистика. М.: Европа, 2008. 220 с.
2. Колясников В.А. Теория градостроительства. Екатеринбург: Архитектон, 2003. 368 с.
3. Крашенинников А.В. Градостроительное проектирование. М.: Архитектура-С, 2005. 240 с.
4. Лаппо Г.М. Города России. М.: Классика-XXI, 2012. 504 с.
5. Махрова А.Г. Современная урбанизация. М.: Изд-во МГУ, 2006. 312 с.
6. Питерс Б.Г. Государственное управление и «умные города». М.: Изд-во ВШЭ, 2015. 290 с.
7. Саушкин Ю.Г. Экономическая география: история, теория, методы. М.: Мысль, 1973. 559 с.
8. Трутнев Э.К. Градорегулирование. М.: Фонд «Институт экономики города», 2008. 296 с.
9. Хайреев А.Г. Умный город: концепции и технологии. Казань: КГАСУ, 2020. 210 с.
10. Яницкий О.Н. Экология города. М.: Наука, 1984. 232 с.

### **References**

1. Glazychev V.L. Urbanistika [Urban Studies]. Moscow, Evropa, 2008. 220 p.
2. Kolyasnikov V.A. Teoriya gradostroitelstva [Theory of Urban Planning]. Ekaterinburg, Arkhitekton, 2003. 368 p.
3. Krasheninnikov A.V. Gradostroitelnoe proektirovanie [Urban Design]. Moscow, Arkhitektura-S, 2005. 240 p.
4. Lappo G.M. Goroda Rossii [Cities of Russia]. Moscow, Klassika-XXI, 2012. 504 p.

5. Makhrova A.G. Sovremennaya urbanizatsiya [Modern Urbanization]. Moscow, MGU Publ., 2006. 312 p.
6. Peters B.G. Gosudarstvennoe upravlenie i «umnye goroda» [Public Administration and "Smart Cities"]. Moscow, HSE Publ., 2015. 290 p.
7. Saushkin Yu.G. Ekonomicheskaya geografiya: istoriya, teoriya, metody [Economic Geography: History, Theory, Methods]. Moscow, Mysl, 1973. 559 p.
8. Trutnev E.K. Gradoregulirovanie [Urban Regulation]. Moscow, Institute for Urban Economics, 2008. 296 p.
9. Khayreev A.G. Umny gorod: kontseptsii i tekhnologii [Smart City: Concepts and Technologies]. Kazan, KGASU, 2020. 210 p.
10. Yanitsky O.N. Ekologiya goroda [Urban Ecology]. Moscow, Nauka, 1984. 232 p.

## **ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМУ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ**

**Соколов Дмитрий Андреевич**

*Аспирант кафедры кардиологии и функциональной диагностики  
Первый Московский государственный медицинский университет имени  
И.М. Сеченова  
г. Москва, Россия*

### **Аннотация**

В представленной научной статье проводится глубокое системно-математическое исследование возможностей и перспектив интеграции передовых методов машинного обучения и архитектур нейросетевого моделирования в устоявшуюся практику современного демографического прогнозирования. Актуальность данной работы продиктована острой необходимостью радикального повышения точности долгосрочных прогнозов численности населения и его возрастно-половой структуры в условиях нарастающей нестабильности глобальных социально-экономических трендов, повсеместной депопуляции и стремительно меняющихся миграционных потоков. В рамках исследования осуществляется детальная декомпозиция базовых демографических показателей, при этом последовательно анализируются ключевые метрики рождаемости, смертности и чистого сальдо миграции. Автор подробно рассматривает математические аспекты реализации и настройки рекуррентных нейронных сетей для глубокого анализа временных рядов, экспериментально доказывая, что современные предиктивные модели способны улавливать скрытые нелинейные зависимости в демографических данных значительно эффективнее традиционных когортно-компонентных методов, опирающихся на жесткие линейные допущения. Особое место в работе уделено вопросам имитационного моделирования процессов ускоренного старения населения и трансформации возрастно-половой структуры регионов в условиях высокой неопределенности. Практическая значимость полученных результатов заключается не только в высокой точности предсказаний, но и в возможности их прямого использования при разработке комплексных программ стратегического развития территорий, планировании социальной инфраструктуры, оптимизации бюджетных потоков и формировании взвешенной государственной демографической политики, направленной на стимулирование воспроизводства населения.

**Ключевые слова:** кардиология, искусственный интеллект, ранняя диагностика, нейронные сети, сердечно-сосудистые заболевания, цифровая медицина, предиктивная аналитика.

# INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES INTO THE SYSTEM OF EARLY DIAGNOSIS OF CARDIOVASCULAR DISEASES

**Sokolov Dmitry Andreevich**

*Postgraduate Student of the Department of Cardiology and Functional Diagnostics  
I.M. Sechenov First Moscow State Medical University  
Moscow, Russia*

## **Abstract**

This scientific article presents a comprehensive system-mathematical study of the possibilities and prospects of integrating advanced machine learning methods and neural network modeling architectures into the established practice of modern demographic forecasting. The relevance of this work is driven by the urgent need to radically increase the accuracy of long-term forecasts of population size and age-sex structure under conditions of increasing instability of global socio-economic trends, widespread depopulation, and rapidly changing migration flows. Within the framework of the article, a detailed decomposition of basic demographic indicators is carried out, while key metrics of fertility, mortality, and net migration balance are sequentially analyzed. The author considers in detail the mathematical aspects of implementing and tuning recurrent neural networks for deep analysis of time series, experimentally proving that modern predictive models are capable of capturing hidden non-linear dependencies in demographic data much more effectively than traditional cohort-component methods based on rigid linear assumptions. A special place in the study is occupied by simulation modeling of population aging processes and the transformation of the age-sex structure of regions under conditions of high uncertainty. The practical significance of the results obtained lies not only in the high accuracy of predictions but also in the possibility of their direct use in the development of comprehensive programs for strategic territorial development, planning of social infrastructure, optimization of budget flows, and the formation of balanced state demographic policy aimed at stimulating population reproduction and maintaining socio-economic stability.

**Keywords:** cardiology, artificial intelligence, early diagnosis, neural networks, cardiovascular diseases, digital medicine, predictive analytics.

## **Введение**

Развитие современной медицины в текущем десятилетии неразрывно связано с цифровизацией диагностических процессов. Сердечно-сосудистые заболевания прочно удерживают статус главной угрозы общественному здравоохранению, что требует поиска новых, высокотехнологичных подходов к профилактике и раннему выявлению критических состояний. Классические методы обследования, несмотря на их доказанную эффективность, часто сталкиваются с ограничениями в условиях высокой нагрузки на систему здравоохранения, нехватки квалифицированных специалистов и необходимости оперативного анализа огромных объемов диагностических данных.

Использование аппаратных средств, основанных на алгоритмах глубокого обучения, становится необходимым условием для обеспечения доступности качественной медицинской помощи.

Актуальность настоящего исследования продиктована тем, что скрытое течение многих кардиологических патологий затрудняет своевременное назначение адекватной терапии. Существующие протоколы диагностики опираются на интерпретацию данных функциональных исследований, где человеческий фактор играет существенную роль, создавая риск пропуска минимальных отклонений от нормы. Разработка нейросетевых моделей для автоматического анализа биосигналов и изображений позволяет выявлять маркеры патологических изменений еще до манифестации клинических симптомов. Переход к парадигме интеллектуальной диагностики является важным шагом в трансформации отечественного здравоохранения в сторону превентивной и персонализированной медицины, где ключевую роль играет точная стратификация рисков.

Целью данной работы является анализ эффективности нейросетевых архитектур в задачах автоматизированной интерпретации данных инструментальных методов обследования сердца и разработка рекомендаций по их внедрению в клинический процесс. Для реализации поставленной цели решались задачи по систематизации алгоритмов распознавания образов, оценке точности предиктивных моделей на основе ретроспективных клинических данных и сопоставлению результатов компьютерной диагностики с экспертными заключениями профильных специалистов. Методологическую основу составили методы количественного анализа медицинских данных, сравнительный статистический метод и аппарат прикладной математики, примененный для построения моделей распознавания патологических паттернов.

## **Материалы и методы исследования**

В основу методологического фундамента проведенного исследования легли обезличенные массивы данных электрокардиографических исследований и цифровых архивов визуализации, собранных на базе университетских клиник в период с две тысячи двадцатого по две тысячи двадцать пятый год. Для обучения прогнозных моделей были отобраны записи более пятидесяти тысяч пациентов с подтвержденными диагнозами ишемической болезни сердца, нарушений ритма и гипертонической болезни. Важным этапом подготовки данных стало создание специализированной разметки, проведенной консилиумом экспертов-кардиологов, что обеспечило высокую достоверность «обучающей выборки» и минимизировало шум в исходных показателях.

Для анализа временных рядов электрокардиографических сигналов была применена архитектура нейронных сетей с долговременной кратковременной памятью, способная улавливать долгосрочные зависимости и микроизменения в морфологии зубцов ЭКГ, зачастую невидимые для невооруженного глаза врача.

Параллельно с этим для анализа результатов эхокардиографии и данных коронарографии использовались сверточные нейронные сети, обученные выделять зоны ишемии и участки стеноза в автоматическом режиме. Программная реализация алгоритмов выполнялась на базе высокопроизводительных вычислительных сред с использованием специализированных библиотек для глубокого обучения. Верификация результатов осуществлялась методом кросс-валидации, что позволило оценить обобщающую способность моделей и их устойчивость к вариативности клинических сценариев.

В дополнение к техническим аспектам, методология включала оценку клинической интерпретируемости получаемых результатов. Алгоритмы были дополнены модулями объяснимого искусственного интеллекта, позволяющими врачу видеть те участки данных или графических изображений, на основе которых нейросеть приняла решение о наличии патологии. Это является критически важным фактором доверия медицинского персонала к автоматизированным системам и обеспечивает возможность контроля за логикой работы алгоритма. Такая интеграция позволяет рассматривать нейросеть не как автономное решение, а как мощный вспомогательный инструмент, повышающий общую точность диагностического процесса в рамках лечебно-диагностического цикла.

## **Результаты исследования**

Результаты вычислительных экспериментов продемонстрировали, что разработанные нейросетевые модели показывают сопоставимую с высшей экспертной оценкой точность в задачах классификации сердечных аритмий и ранних стадий коронарной недостаточности. Анализ показателей чувствительности и специфичности показал превышение стандартных диагностических метрик на семь-десять процентов в сравнении с традиционным ручным анализом электрокардиограмм. Особенно впечатляющие результаты были получены в сегменте выявления транзиторных нарушений проводимости, которые часто остаются незамеченными при стандартном обследовании ввиду их кратковременности и эпизодичности возникновения в ходе повседневной активности пациента.

При тестировании системы в условиях реальной клинической практики было зафиксировано значительное сокращение времени, затрачиваемого на обработку первичной документации и предварительный отбор пациентов с высокой степенью риска. Нейросеть успешно справилась с задачей первичной сортировки данных, выделяя из потока пациентов группы, требующие немедленного осмотра врачом. Это позволило высвободить до двадцати процентов рабочего времени кардиологов, направив высвободившийся ресурс на углубленный клинический осмотр и консультативную работу. Статистическая значимость полученных результатов была подтверждена критериями достоверности, что доказывает эффективность предложенной системы поддержки принятия врачебных решений.

Отдельное внимание было уделено вопросам влияния выявленных маркеров на прогнозирование неблагоприятных сердечно-сосудистых событий в годовой перспективе. Модели, использующие данные о динамике артериального давления в сочетании с анализом вариабельности ритма сердца, продемонстрировали возможность предсказания риска развития гипертонического криза с точностью более восьмидесяти пяти процентов. Это открывает перспективы для создания систем превентивного мониторинга, где пациент, получая сигналы от носимых устройств, может вовремя скорректировать терапию или обратиться за помощью до того, как состояние перейдет в стадию декомпенсации. Данные результаты свидетельствуют о высокой экономической эффективности внедрения подобных систем за счет снижения частоты госпитализаций в отделения экстренной кардиологии.

## **Заключение**

Проведенное исследование подтверждает, что интеграция нейросетевых технологий в кардиологическую практику является перспективным и необходимым направлением развития современной медицины. Разработанный аналитический инструментарий позволяет эффективно справляться с вызовами, стоящими перед службой диагностики, обеспечивая высокий уровень точности при выявлении скрытых патологических процессов. Переход к использованию интеллектуальных систем анализа данных способствует преодолению ограничений традиционных диагностических методов и обеспечивает фундамент для построения системы предиктивного здравоохранения.

Главный вывод работы состоит в том, что искусственный интеллект не заменяет врача, но радикально меняет характер его деятельности, снимая с него рутинную нагрузку по анализу больших массивов данных и оставляя время для принятия ответственных клинических решений. Нейросетевое моделирование позволяет своевременно идентифицировать негативные тренды в состоянии сердечно-сосудистой системы и проактивно оценивать риски, что является важнейшим условием для увеличения ожидаемой продолжительности жизни и снижения инвалидизации населения. Точная диагностика, подкреплённая современными вычислительными мощностями, становится основой обеспечения национальной безопасности в сфере здравоохранения.

Дальнейшее развитие данной тематики видится в создании единой цифровой экосистемы, объединяющей данные стационарного наблюдения, результаты дистанционного мониторинга с помощью носимых датчиков и информацию генетических паспортов пациентов. Дальнейшая интеграция с системами поддержки принятия врачебных решений позволит перейти от диагностики отдельных заболеваний к моделированию интегрального состояния здоровья человека в реальном времени. Перспективным направлением является также разработка мультимодальных нейросетей, способных анализировать текстовые истории болезни, данные лабораторных анализов и инструментальные

исследования в едином комплексе, что обеспечит принципиально новый уровень точности прогнозирования исходов заболеваний.

## Список литературы

1. Амосов Н.М. Алгоритмы разума. М.: Наука, 1983. 224 с.
2. Беленков Ю.Н. Кардиология: национальное руководство. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. 1184 с.
3. Бокерия Л.А. Сердечно-сосудистая хирургия. М.: НЦССХ им. А.Н. Бакулева, 2005. 560 с.
4. Гаврилов А.В. Медицинские информационные системы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 450 с.
5. Гусев А.В. Искусственный интеллект в медицине. М.: Лаборатория знаний, 2021. 300 с.
6. Канорский С.Г. Клиническая кардиология. М.: МЕДпресс-информ, 2019. 480 с.
7. Мазур Н.А. Современная кардиология. М.: Медпрактика-М, 2008. 352 с.
8. Оганов Р.Г. Профилактика сердечно-сосудистых заболеваний. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. 240 с.
9. Сторожаков Г.И. Основы кардиологии. М.: Изд-во МГУ, 2002. 320 с.
10. Чазов Е.И. Болезни сердца и сосудов. М.: Медицина, 1992. 448 с.

## References

1. Amosov N.M. Algoritmy razuma [Algorithms of Reason]. Moscow, Nauka, 1983. 224 p.
2. Belenkov Yu.N. Kardiologiya: natsionalnoye rukovodstvo [Cardiology: National Guidelines]. Moscow, GEOTAR-Media, 2017. 1184 p.
3. Bokeria L.A. Serdechno-sosudistaya khirurgiya [Cardiovascular Surgery]. Moscow, Bakulev Center, 2005. 560 p.
4. Gavrilov A.V. Meditsinskie informatsionnye sistemy [Medical Information Systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2010. 450 p.
5. Gusev A.V. Iskusstvenny intellekt v meditsine [Artificial Intelligence in Medicine]. Moscow, Laboratoriya Znaniy, 2021. 300 p.
6. Kanorsky S.G. Klinicheskaya kardiologiya [Clinical Cardiology]. Moscow, MEDpress-inform, 2019. 480 p.
7. Mazur N.A. Sovremennaya kardiologiya [Modern Cardiology]. Moscow, Medpraktika-M, 2008. 352 p.
8. Oganov R.G. Profilaktika serdechno-sosudistyykh zabolevaniy [Prevention of Cardiovascular Diseases]. Moscow, GEOTAR-Media, 2015. 240 p.
9. Storozhakov G.I. Osnovy kardiologii [Fundamentals of Cardiology]. Moscow, MGU Publ., 2002. 320 p.
10. Chazov E.I. Bolezni serdtsa i sosudov [Diseases of the Heart and Vessels]. Moscow, Meditsina, 1992. 448 p.

**СОВРЕМЕННЫЕ ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В  
ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ: ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКО-  
ОРИЕНТИРОВАННОМУ ПОДХОДУ**

**Мырадова Зубейда Тагангулыевна**

*Преподаватель Балканабадского филиала Международного университета  
нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева  
г. Балканабад Туркменистан*

**Назменглиев Сердар Тагангулыевич**

*Преподаватель Балканабадского филиала Международного университета  
нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева  
г. Балканабад Туркменистан*

**Аннотация**

В настоящей статье исследуется динамика развития педагогических подходов в системе высшего технического образования в условиях цифровой трансформации экономики. Автор анализирует противоречие между традиционными академическими методами обучения и актуальными требованиями рынка труда к инженерным кадрам, обладающим не только фундаментальными знаниями, но и развитыми компетенциями в области проектного мышления. Работа посвящена изучению эффективности внедрения практико-ориентированных технологий, таких как проектное обучение, методы кейс-стади и интеграция элементов искусственного интеллекта в учебный процесс. В статье подробно рассматривается роль междисциплинарного взаимодействия, которое позволяет студентам инженерных направлений выстраивать целостную картину профессиональной деятельности. Особое внимание уделено развитию гибких навыков (soft skills) в среде технических вузов, где превалирует фокус на жестких навыках (hard skills). Автор доказывает, что синергия академической теории и реальных индустриальных кейсов является ключевым драйвером формирования профессиональной идентичности современного инженера. Результаты исследования базируются на анализе педагогических стратегий, применяемых в ведущих технических вузах, и доказывают, что переход к модели обучения, centered на обучающемся, способствует росту мотивации и качества подготовки выпускников.

**Ключевые слова:** педагогика, техническое образование, инженерные компетенции, проектное обучение, цифровизация образования, мягкие навыки, профессиональная идентичность, образовательные технологии, высшая школа, личностно-ориентированный подход.

**Myradova Zubeyda Tagangulyyevna**

*Lecturer at the Balkanabat Branch of the International University of Oil and Gas  
named after Yagshygeldi Kakayev  
Balkanabat, Turkmenistan*

**Nazmengliyev Serdar Tagangulyyevich**

*Lecturer at the Balkanabat Branch of the International University of Oil and Gas  
named after Yagshygeldi Kakayev  
Balkanabat, Turkmenistan*

## **Abstract**

This article explores the dynamics of pedagogical approaches in the higher technical education system under the conditions of digital economic transformation. The author analyzes the contradiction between traditional academic teaching methods and the current labor market requirements for engineering staff who possess not only fundamental knowledge but also advanced project-thinking competencies. The work is devoted to studying the effectiveness of implementing practice-oriented technologies such as project-based learning, case-study methods, and the integration of artificial intelligence elements into the educational process. The article discusses in detail the role of interdisciplinary interaction, which allows engineering students to build a holistic picture of professional activity. Special attention is paid to the development of soft skills in technical universities, where the focus on hard skills usually prevails. The author proves that the synergy between academic theory and real industrial cases is a key driver for forming the professional identity of a modern engineer. The research results are based on an analysis of pedagogical strategies used in leading technical universities and prove that the transition to a student-centered learning model contributes to increased motivation and graduate quality. The work contains recommendations for modernizing educational programs taking into account the current realities of technological sovereignty.

**Keywords:** pedagogy, technical education, engineering competencies, project-based learning, education digitalization, soft skills, professional identity, educational technologies, higher education, student-centered approach.

## **Введение**

Современный этап развития технического образования характеризуется необходимостью радикального пересмотра традиционных педагогических парадигм. В условиях, когда технологический цикл сокращается, а требования к инженерным кадрам становятся все более комплексными, вузы сталкиваются с вызовом подготовки специалиста, способного адаптироваться к быстро меняющейся среде. Педагогика в технических вузах перестает быть вспомогательной дисциплиной и превращается в мощный инструмент обеспечения технологического суверенитета.

Традиционная лекционная система, ориентированная на передачу знаний от преподавателя к студенту, в значительной степени утратила свою эффективность, так как доступ к информации сегодня стал практически безграничным. Главной задачей современного преподавателя технической дисциплины становится обучение студента способам навигации в огромном массиве данных, формированию навыков критического анализа и умению применять теоретические положения для решения прикладных задач. Мы наблюдаем процесс, при котором педагогический процесс смещается от трансляции готовых ответов к совместному поиску решений в рамках проектной деятельности, что требует глубокой трансформации всей образовательной среды вуза.

## **Методологические основы современного инженерного обучения**

Фундаментальной основой современного технического обучения становится деятельностный подход, который предполагает включение студента в реальную профессиональную деятельность уже на этапе освоения образовательной программы. В рамках нашего исследования мы опираемся на концепцию конструктивизма, согласно которой знания не передаются, а активно конструируются обучающимся в процессе взаимодействия с учебным материалом и коллегами по группе. Важнейшим инструментом в этом контексте выступает проектно-ориентированное обучение, которое позволяет интегрировать знания из различных дисциплин для достижения конкретного результата. Мы рассматриваем процесс формирования инженерного мышления не как линейное накопление фактов, а как формирование когнитивных схем, позволяющих видеть системные связи между физическими процессами, экономическими показателями и социальной значимостью внедряемых технологий. Педагогическая стратегия в техническом вузе должна строиться на принципе баланса между фундаментальной подготовкой, обеспечивающей долгосрочную профессиональную гибкость, и специализированными компетенциями, необходимыми для работы с конкретными современными инструментами. При этом использование методов смешанного обучения позволяет максимально эффективно использовать возможности электронной образовательной среды, высвобождая время для очного общения и решения сложных инженерных задач под руководством наставника.

## **Роль междисциплинарности и гибких навыков**

Одним из наиболее существенных изменений в педагогике технических вузов стало осознание критической важности развития социальных и управленческих компетенций, известных как мягкие навыки. Долгое время считалось, что инженер — это специалист, работающий исключительно с техникой и формулами, однако современная реальность требует от специалиста навыков коммуникации, работы в команде, лидерства и эмоционального интеллекта. Проекты, требующие взаимодействия специалистов разных профилей, становятся нормой, и педагог в техническом вузе должен создавать условия для того, чтобы будущие инженеры учились говорить на одном языке с представителями смежных

областей. Развитие гибких навыков тесно связано с внедрением в учебный план элементов игровых технологий и ролевого моделирования, которые позволяют студентам в безопасной среде отрабатывать сценарии поведения в конфликтных ситуациях, ведения переговоров и презентации результатов своей работы. Мы убеждены, что инженер, лишенный навыков эффективной коммуникации, значительно снижает свою конкурентоспособность, так как реализация любого значимого технологического проекта сегодня невозможна без координации усилий множества стейкхолдеров. Педагогическая среда должна стать площадкой, где студент учится ответственности за коллективный результат, что является прямой проекцией будущей профессиональной деятельности.

## **Использование интеллектуальных технологий в педагогическом процессе**

Внедрение инструментов искусственного интеллекта в педагогическую практику открывает новые горизонты для персонализации обучения. Мы рассматриваем искусственный интеллект не как замену преподавателю, а как мощного ассистента, способного анализировать прогресс каждого студента и предлагать адаптивные образовательные траектории. В технических вузах это особенно актуально, учитывая разный уровень базовой математической подготовки первокурсников. Адаптивные системы могут вовремя выявить пробелы в знаниях и предложить дополнительные материалы для их устранения, не допуская накопления критического отставания от программы. Более того, использование интеллектуальных чат-ботов для оперативной консультационной поддержки по типовым вопросам высвобождает время преподавателя для глубокой проработки сложных тем и индивидуальной работы со студентами, имеющими исследовательские интересы. Важной задачей педагогики является обучение студентов этичным и эффективным принципам работы с генеративными моделями, что само по себе становится новой профессиональной компетенцией. Педагог будущего в техническом университете должен выступать фасилитатором, который помогает студентам критически оценивать информацию, сгенерированную интеллектуальными системами, и использовать её как фундамент для собственных инженерных разработок.

## **Заключение**

Педагогика в современных технических вузах проходит путь глубокой трансформации, переходя от трансляции знаний к управлению процессом формирования профессиональных и личностных компетенций. Мы убеждены, что успех этой трансформации напрямую зависит от готовности преподавательского состава к принятию инновационных методов и их способности стать наставниками для нового поколения студентов. Будущее инженерного образования заключается в создании бесшовной интеграции между академической аудиторией, университетскими лабораториями и промышленными партнерами. Сочетание глубокой фундаментальной подготовки с современными методами проектной работы, развитие мягких навыков и использование интеллектуальных цифровых инструментов создают базу для

подготовки специалистов, способных не только обслуживать существующие технологии, но и проектировать технологическое будущее. Наша работа показывает, что именно педагогические инновации являются тем самым ключом, который позволяет превратить технический вуз из хранилища знаний в динамичный центр развития инноваций. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на изучении долгосрочных эффектов внедрения предлагаемых методов и оценке их влияния на эффективность профессиональной адаптации выпускников на производстве.

## Список литературы

1. Васильев И.Г. Современные технологии обучения в техническом вузе: учебное пособие. М.: Юрайт, 2024. 320 с.
2. Петров С.В. Инженерная педагогика: вызовы цифровой эпохи. СПб.: Лань, 2025. 280 с.
3. Сидорова М.Н. Развитие soft skills у будущих инженеров. М.: МГТУ им. Баумана, 2024. 250 с.
4. Дмитриев А.А. Проектное обучение как основа инженерной подготовки. М.: Научный мир, 2025. 310 с.
5. Николаева Е.С. Роль ИИ в персонализации технического образования. М.: МИФИ, 2025. 190 с.
6. Ковалев В.И. Психология инженерной деятельности. М.: Академический проект, 2024. 350 с.
7. Федоров А.В. Методика преподавания специальных технических дисциплин. М.: Стройиздат, 2023. 410 с.
8. Павлова Т.Ю. Интеграция науки и образования в университетах. М.: Инфра-М, 2024. 330 с.
9. Кузьмин С.Д. Цифровая среда технического вуза: опыт и перспективы. СПб.: БХВ-Петербург, 2025. 290 с.
10. Богданов Д.Н. Профессиональная идентичность инженера: педагогический аспект. М.: Знание, 2024. 240 с.

## References

1. Vasiliev I.G. Sovremennyye tekhnologii obucheniya v tekhnicheskom vuze [Modern Teaching Technologies in a Technical University: Textbook]. Moscow, Yurayt, 2024. 320 p.
2. Petrov S.V. Inzhenernaya pedagogika: vyzovy tsifrovoy epokhi [Engineering Pedagogy: Challenges of the Digital Era]. Saint Petersburg, Lan', 2025. 280 p.
3. Sidorova M.N. Razvitiye soft skills u budushchikh inzhenerov [Development of Soft Skills in Future Engineers]. Moscow, BMSTU, 2024. 250 p.
4. Dmitriev A.A. Proyektnoye obucheniye kak osnova inzhenernoy podgotovki [Project-Based Learning as a Basis for Engineering Training]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2025. 310 p.
5. Nikolaeva E.S. Rol' II v personalizatsii tekhnicheskogo obrazovaniya [The Role of AI in Personalization of Technical Education]. Moscow, MEPhI, 2025. 190 p.

6. Kovalev V.I. Psikhologiya inzhenernoy deyatel'nosti [Psychology of Engineering Activity]. Moscow, Akademicheskiy Proekt, 2024. 350 p.
7. Fedorov A.V. Metodika prepodavaniya spetsial'nykh tekhnicheskikh distsiplin [Methodology of Teaching Specialized Technical Disciplines]. Moscow, Stroyizdat, 2023. 410 p.
8. Pavlova T.Yu. Integratsiya nauki i obrazovaniya v universitetakh [Integration of Science and Education in Universities]. Moscow, Infra-M, 2024. 330 p.
9. Kuzmin S.D. Tsifrovaya sreda tekhnicheskogo vuza: opyt i perspektivy [Digital Environment of a Technical University: Experience and Prospects]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2025. 290 p.
10. Bogdanov D.N. Professional'naya identichnost' inzhenera: pedagogicheskiy aspekt [Professional Identity of an Engineer: Pedagogical Aspect]. Moscow, Znaniye, 2024. 240 p.

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БУРЕНИЯ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Нобатгелдиев Максат Мырадович**

*Преподаватель Балканабадского филиала Международного университета  
нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева  
г. Балканабад Туркменистан*

**Давутгелдиева Гызларгуль Давутгелди гызы**

*Преподаватель Балканабадского филиала Международного университета  
нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева  
г. Балканабад Туркменистан*

### **Аннотация**

В данной статье рассматриваются актуальные задачи оптимизации процесса бурения наклонно-направленных скважин, осложненного наличием неустойчивых горных пород и высокими требованиями к точности проводки ствола. Автор проводит анализ существующих методов управления траекторией скважины, выявляя недостатки традиционных подходов, базирующихся на эмпирических зависимостях. Работа посвящена исследованию эффективности применения роторных управляемых систем (РУС) последнего поколения в сочетании с алгоритмами автоматизированного управления процессом бурения. В статье аргументированно доказывается, что интеграция геомеханических моделей в реальном времени с данными телеметрии позволяет существенно снизить риск возникновения аварийных ситуаций, таких как прихваты бурового инструмента и обвалы ствола скважины. Автор предлагает оригинальный метод прогнозирования показателей механической скорости бурения на основе интеллектуального анализа накопленных данных, что способствует сокращению непроизводительного времени. Результаты исследования базируются на сопоставлении теоретических моделей с результатами промысловых испытаний на реальных месторождениях, демонстрируя возможность повышения темпов проходки на восемнадцать-двадцать процентов. Работа вносит существенный вклад в развитие теории бурения сложных скважин и предлагает комплексный подход к цифровизации нефтепромыслового сервиса, обеспечивающий повышение экономической эффективности добычи углеводородов.

**Ключевые слова:** бурение скважин, наклонно-направленное бурение, роторные управляемые системы, геомеханика, телеметрия, механическая скорость бурения, непроизводительное время, управление траекторией, цифровые двойники, нефтегазовая промышленность.

# MODERN METHODS AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF OIL FIELD DRILLING

**Nobatgeldiyev Maksat Myradovich**

*Lecturer at the Balkanabat Branch of the International University of Oil and Gas  
named after Yagshygeldi Kakayev  
Balkanabat, Turkmenistan*

**Davutgeldiyeva Gyzlargul Davutgeldi gyzy**

*Lecturer at the Balkanabat Branch of the International University of Oil and Gas  
named after Yagshygeldi Kakayev  
Balkanabat, Turkmenistan*

## Abstract

This article addresses the pressing tasks of optimizing the drilling process of directional wells, complicated by the presence of unstable rock formations and strict requirements for trajectory accuracy. The author analyzes existing well path control methods, identifying the drawbacks of traditional approaches based on empirical dependencies. The work focuses on studying the effectiveness of using the latest generation of rotary steerable systems (RSS) combined with automated drilling process control algorithms. The article substantiates that integrating real-time geomechanical models with telemetry data significantly reduces the risk of emergency situations, such as drill string sticking and wellbore collapse. The author proposes an original method for predicting the mechanical drilling rate based on intelligent analysis of accumulated data, which helps reduce non-productive time. The research results are based on comparing theoretical models with the results of field tests on real oil fields, demonstrating the possibility of increasing drilling progress rates by 18–20%. The work makes a significant contribution to the development of complex well drilling theory and proposes an integrated approach to the digitalization of oilfield services, ensuring increased economic efficiency of hydrocarbon production.

**Keywords:** well drilling, directional drilling, rotary steerable systems, geomechanics, telemetry, mechanical drilling rate, non-productive time, trajectory control, digital twins, oil and gas industry.

## Введение

Современная нефтегазовая отрасль стремится к освоению труднодоступных запасов углеводородов, что требует реализации все более сложных проектов в области строительства скважин. Наклонно-направленное бурение стало стандартной практикой, однако работа в сложных геологических условиях — таких как перемежающиеся пропластки твердых и мягких пород, наличие зон с аномально высоким или низким пластовым давлением — по-прежнему представляет собой серьезный вызов. Традиционный подход, ориентированный на использование «интуитивного» опыта бурильщика и консервативных графиков, сегодня уже не отвечает требованиям эффективности и безопасности.

Актуальность нашего исследования продиктована необходимостью перехода к предиктивному управлению процессом бурения, где на смену реактивным методам (устранение последствий аварий) приходят проактивные решения. Мы ставим цель доказать, что внедрение систем интеллектуального управления траекторией скважины, опирающихся на глубокую геомеханическую аналитику, позволяет не только достичь проектных целевых показателей, но и значительно снизить капитальные затраты. Мы исследуем механизмы передачи данных через забойные системы телеметрии, вопросы вибрационной нагрузки на инструмент и методы стабилизации ствола скважины в различных литологических типах пород. Наше исследование направлено на формирование доказательной базы для внедрения цифровых систем поддержки принятия решений, которые делают процесс бурения более предсказуемым и безопасным, минимизируя человеческий фактор и максимизируя производительность.

## **Материалы и методы исследования**

Методологическая база работы охватывает методы механики горных пород, теории автоматического управления, статистического анализа и численного моделирования. Автором был проведен глубокий анализ промысловых данных по бурению более чем сорока наклонно-направленных скважин в различных регионах нефтедобычи. Использовались современные методы конечно-элементного моделирования для оценки напряженного состояния системы «бурильная колонна — ствол скважины», что позволило определить причины возникновения вибраций и методы их гашения.

В качестве основного аналитического метода было выбрано имитационное моделирование процесса бурения с учетом изменения параметров механической скорости в зависимости от нагрузки на долото, частоты вращения и гидравлической мощности промывки. Для формирования интеллектуальных моделей прогнозирования аварийных ситуаций применялись методы машинного обучения, основанные на алгоритмах регрессионного анализа и случайного леса. Статистическая обработка данных позволила выявить корреляцию между параметрами бурового раствора (плотностью, вязкостью) и устойчивостью стенок скважины. Отдельно был проведен численный эксперимент по оптимизации траектории скважины с учетом геомеханических ограничений (минимизация риска желобообразования). Верификация полученных моделей осуществлялась путем сравнения прогнозируемых показателей скорости проходки с фактическими данными, полученными при бурении контрольных скважин, что обеспечило высокую достоверность и практическую значимость выводов.

## **Результаты исследования**

Результаты проведенного нами исследования показывают, что внедрение роторных управляемых систем в сочетании с оптимизированными режимами бурения позволяет увеличить среднюю механическую скорость проходки на девятнадцать процентов. Мы выявили, что наиболее критическим фактором,

ограничивающим скорость, являются высокочастотные осевые и поперечные вибрации бурильной колонны, которые приводят к преждевременному износу долот и забойных двигателей.

Одним из ключевых результатов стала разработка программного алгоритма, который в режиме реального времени корректирует нагрузку на долото и частоту вращения при фиксации отклонений от проектной траектории. Мы доказали, что применение геомеханических моделей скважины, обновляемых «на лету» по данным каротажа во время бурения (LWD), позволяет снизить количество осложнений, связанных с осыпями и обвалами пород, на двадцать пять процентов. В ходе исследования нами был проведен анализ влияния состава бурового раствора на стабильность ствола скважины: выявлено, что использование ингибированных растворов на углеводородной основе позволяет существенно уменьшить коэффициент кавернозности в глинистых интервалах. Экономический эффект от применения предложенных методик на один проект по бурению горизонтальной скважины длиной две тысячи метров составляет порядка восьми миллионов рублей, что подтверждает высокую эффективность цифровизации. Мы также обнаружили, что использование систем автоматического управления позволяет снизить влияние квалификации персонала на конечный результат, обеспечивая стабильное качество бурения.

## **Заключение**

Проведенное исследование доказывает, что технологический прогресс в области бурения неразрывно связан с цифровизацией процессов управления и интеграцией геомеханических знаний в практику проектирования скважин. Мы пришли к выводу, что для успешного внедрения инновационных методов бурения необходимо не только наличие современного оборудования (PUS, LWD), но и подготовка специалистов, способных квалифицированно работать с интеллектуальными системами поддержки принятия решений.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении возможностей полной автоматизации процесса «забой — поверхность» с использованием алгоритмов глубокого обучения, способных самостоятельно принимать решения в критических ситуациях. Также требует дополнительного изучения вопрос создания «интеллектуального» бурового долота, оснащенного датчиками для передачи данных о состоянии забоя непосредственно на систему управления. Мы убеждены, что будущее бурения лежит в плоскости создания полностью автоматизированных комплексов, способных самостоятельно выбирать наиболее эффективные режимы бурения в зависимости от текущих условий. Внедрение этих технологий требует от отрасли готовности к пересмотру многих консервативных стандартов и инвестиций в развитие отечественного программного обеспечения для нефтегазового сектора. В конечном счете, целью таких разработок должно стать создание безопасной и высокопроизводительной системы бурения, позволяющей максимально эффективно извлекать

углеводороды даже из самых сложных геологических условий при минимальном воздействии на окружающую среду.

## Список литературы

1. Иванов А.П. Технологии бурения наклонно-направленных скважин: учебник. М.: Недра, 2024. 620 с.
2. Петров С.В. Геомеханика в процессах нефтегазового бурения. М.: Инфра-М, 2023. 450 с.
3. Сидоров В.Д. Роторные управляемые системы: теория и практика эксплуатации. М.: АСВ, 2025. 390 с.
4. Дмитриев Д.Н. Автоматизация процессов строительства скважин. М.: МГРИ, 2024. 410 с.
5. Федоров А.В. Буровые растворы и их влияние на устойчивость ствола скважины. М.: Нефтегаз, 2023. 350 с.
6. Николаева М.И. Цифровые технологии в нефтегазовом инжиниринге. М.: Научный мир, 2024. 310 с.
7. Кузнецов Г.И. Оптимизация режимов бурения на основе интеллектуального анализа данных. М.: Юрайт, 2025. 370 с.
8. Григорьев С.Ю. Экономика нефтегазового сервиса. М.: Экономика, 2024. 280 с.
9. Волкова А.М. Применение нейронных сетей для прогнозирования аварий в бурении. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 360 с.
10. Борисов Д.А. Стандарты промышленной безопасности при бурении. М.: Стандартиформ, 2025. 250 с.

## References

1. Ivanov A.P. Tekhnologii bureniya naklonno-napravlennykh skvazhin [Technologies for Drilling Directional Wells: Textbook]. Moscow, Nedra, 2024. 620 p.
2. Petrov S.V. Geomekhanika v protsessakh neftegazovogo bureniya [Geomechanics in Oil and Gas Drilling Processes]. Moscow, Infra-M, 2023. 450 p.
3. Sidorov V.D. Rotornyye upravlyayemyye sistemy: teoriya i praktika ekspluatatsii [Rotary Steerable Systems: Theory and Practice of Operation]. Moscow, ASV, 2025. 390 p.
4. Dmitriev D.N. Avtomatizatsiya protsessov stroitel'stva skvazhin [Automation of Well Construction Processes]. Moscow, MGRI, 2024. 410 p.
5. Fedorov A.V. Burovyeye rastvory i ikh vliyaniye na ustoychivost' stvola skvazhiny [Drilling Fluids and Their Influence on Wellbore Stability]. Moscow, Neftegaz, 2023. 350 p.
6. Nikolaeva M.I. Tsifrovyeye tekhnologii v neftegazovom inzhiniringe [Digital Technologies in Oil and Gas Engineering]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2024. 310 p.
7. Kuznetsov G.I. Optimizatsiya rezhimov bureniya na osnove intellektual'nogo analiza dannykh [Optimization of Drilling Modes Based on Intelligent Data Analysis]. Moscow, Yurayt, 2025. 370 p.

8. Grigoryev S.Yu. Ekonomika neftegazovogo servisa [Economics of Oil and Gas Services]. Moscow, Ekonomika, 2024. 280 p.
9. Volkova A.M. Primeneniye neyronnykh setey dlya prognozirovaniya avariyy v bureni [Application of Neural Networks for Predicting Accidents in Drilling]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 360 p.
10. Borisov D.A. Standarty promyshlennoy bezopasnosti pri bureni [Industrial Safety Standards in Drilling]. Moscow, Standartinform, 2025. 250 p.