

УДК 658.512

DOI 10.26118/2782-4586.2025.62.63.075

Бойкова Анна Викторовна

Тверской государственный технический университет

Витяхова Юлия Владимировна

Тверской государственный технический университет

Внедрение цифровых двойников в строительной отрасли: направления и проблемы

Аннотация. Статья посвящена исследованию внедрения цифровых двойников в строительной отрасли, анализу их ключевых направлений применения и выявлению основных проблем, препятствующих их широкому распространению. Авторы рассматривают концепцию цифровых двойников, их эволюцию и роль в повышении производительности труда, оптимизации процессов проектирования, управления строительством и эксплуатации объектов. На примере успешных кейсов, таких как использование цифровых двойников при строительстве аэропорта Хуаху в Китае, демонстрируется потенциал технологии для сокращения сроков и затрат.

Особое внимание уделено таким направлениям, как виртуальное проектирование, мониторинг состояния конструкций, управление цепочками поставок и обеспечение безопасности. В статье также подробно анализируются ключевые вызовы, включая сложности интеграции многомодальных данных, вопросы масштабируемости, обеспечения информационной безопасности и высоких затрат на внедрение.

Проведённый обзор позволяет сделать вывод о значительном потенциале цифровых двойников для трансформации строительной отрасли, а также о необходимости разработки стандартизованных решений и преодоления существующих технологических и организационных барьеров.

Ключевые слова: цифровые двойники, информационные технологии, строительная отрасль, информационная безопасность, прототип

Boykova Anna Viktorovna

Tver State Technical University

Vityahova Yulia Vladimirovna

Tver State Technical University

Implementation of digital twins in the construction industry: directions and problems

Abstract. The article explores the implementation of digital twins in the construction industry, analyzing their key applications and identifying major challenges hindering their widespread adoption. The authors examine the concept of digital twins, their evolution, and their role in improving labor productivity, optimizing design processes, construction management, and facility operations. Successful case studies, such as the use of digital twins in the construction of Huahu Airport in China, demonstrate the technology's potential to reduce timelines and costs.

Special attention is given to areas like virtual design, structural health monitoring, supply chain management, and safety enhancement. The article also provides a detailed analysis of key challenges, including the integration of multimodal data, scalability issues, data security, and high implementation costs.

The review concludes that digital twins hold significant potential for transforming the construction industry but require standardized solutions and overcoming existing technological and organizational barriers.

Keywords: digital twins, information technology, construction industry, information security, prototype

Согласно аналитическому отчету консалтинговой компании McKinsey & Co, «с 2000 по 2022 год производительность труда в строительной отрасли во всем мире увеличилась всего на 10%, что составляет лишь одну пятую от общего темпа роста экономики» [1]. Особенno сложная ситуация в развитых странах, таких как США и страны Европы. Это уже привело к нехватке квалифицированных кадров (например, в США с 2017 года по 2023 год количество вакансий в строительстве удвоилось). Усугубляет проблему и тот факт, что большинство занятых в строительной сфере приближаются к пенсионному возрасту [1].

Все это делает актуальным поиск путей повышения эффективности за счет повышения производительности труда в отрасли. Одним из них является внедрение цифровых технологий.

Впервые термин «digital twin» (цифровые двойники) использовался Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) для описания двух идентичных космических аппаратов, один из которых имитировал условия миссии [2].

В 2002 году доктор Майкл Гревз (университет Мичигана) предложил концепцию цифровых двойников в качестве нового подхода к управлению жизненным циклом физического продукта, которая получила распространение во многих областях, включая управление цепочками поставок, удаленную диагностику оборудования, предиктивное обслуживание и другие [3].

В работе Омрани Х., Аль-Обаиди К.М., Хусейн А., Гаффарианхосейни А. приводится следующее определение цифрового двойника (Digital Twin, DT, ЦД) – цифрового аналога физического объекта, моделирующего его поведение в реальной среде с помощью данных [4].

Сегодня цифровые двойники находят применение в производстве, логистике и, всё чаще, в строительстве. Так, например, при строительстве международного аэропорта Хуаху в Эчжоу (Китай) использовались цифровые двойники на базе BIM и iTwin, что позволило сократить сроки на 200 дней и бюджет на 300 млн. юаней [5].

Схематично модель цифрового двойника приведена на рисунке 1.



Рис.1 – Концептуальная модель технологии цифровых двойников [4]

В основе работы цифрового двойника лежит последовательность операции, обеспечивающих поток данных между физическими и цифровыми доменами, которая называется цифровым потоком [4].

1. Данные собираются с физического объекта и его окружения и отправляются в централизованный репозиторий [3].

2. Данные анализируются и подготавливаются для отправки в цифровой двойник [3].

3. Цифровой двойник использует актуальные данные для отображения работы объекта в режиме реального времени, тестирования последствий изменения окружающей среды и выявления узких мест. На этом этапе алгоритмы ИИ могут быть применены для корректировки конструкции продукта или выявления неблагоприятных тенденций, а также для предотвращения дорогостоящих простоев [3].

4. Аналитические данные визуализируются и представляются на панели инструментов [3].

5. Заинтересованные стороны принимают практические решения на основе данных [3].

6. Соответствующим образом корректируются параметры физических объектов, процессы или графики технического обслуживания [3].

Затем процесс повторяется с учётом новых данных [3].

Обзор различных источников позволил выявить направления применения цифровых двойников, приведенные на рисунке 2.

Использование ЦД позволяет инженерам и архитекторам создавать высокоточные цифровые модели физических объектов и систем, что способствует улучшению качества проектных решений и их реалистичности [6].

Например, Лу Р., Брилакис И. [7, 8] разработали метод геометрического моделирования мостов с помощью ЦД, что позволило достичь средней точности 7,05 см за 37,8 секунд моделирования – существенно быстрее по сравнению с ручными методами.

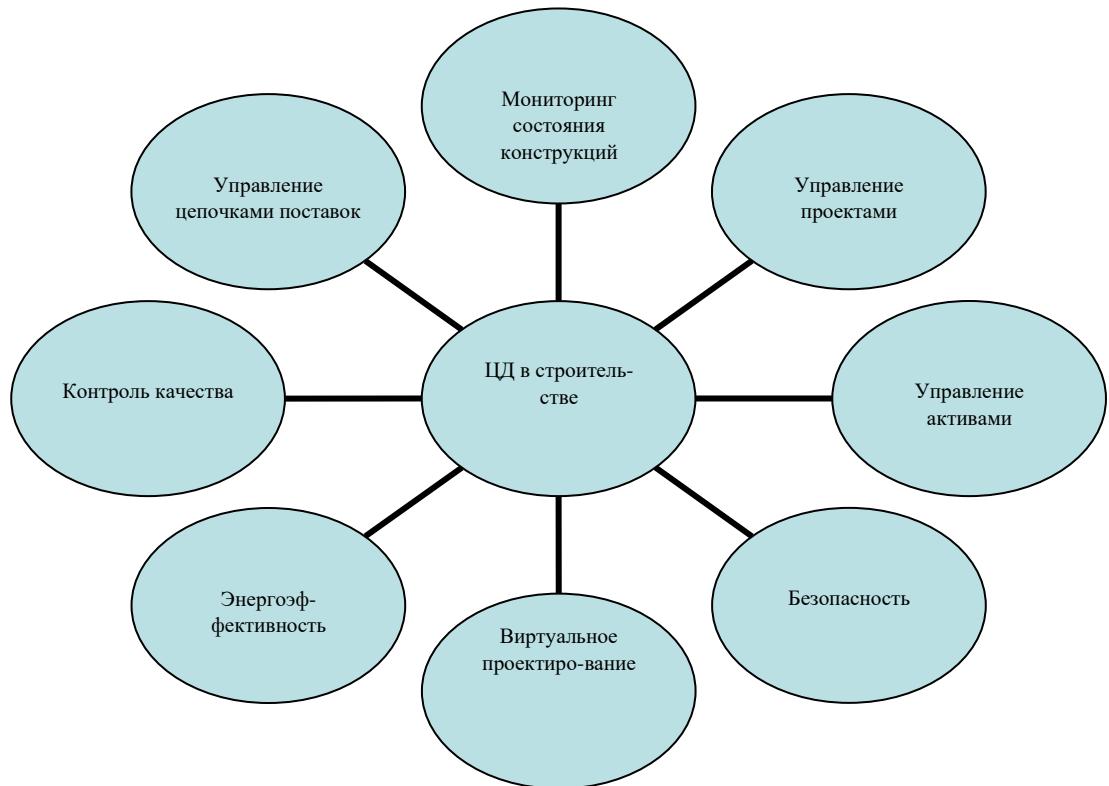


Рис.2 – Направления применения цифровых двойников в строительстве [4]

Благодаря возможностям виртуального моделирования процессов, систем и объектов, ЦД способствует оптимизации процессов планирования, оценки рисков и улучшению контроля выполнения [9].

Цян И., Лю С., Ван З., Ли М., Чжун Р. И., Хуан Г. Ц. предложили платформу на базе ЦД и блокчейна для обеспечения прозрачности и надежности при реализации модульных проектов. Это позволило организовать взаимодействие и координирование действий между участниками в режиме реального времени, одновременно обеспечивая целостность и сохранность данных [9].

Технология цифровых двойников становится всё более востребованной в процессе управления и технического обслуживания объектов недвижимости. В частности, ЦД позволяет осуществлять мониторинг состояния физических объектов в реальном времени, обеспечивая профилактическое наблюдение и снижая вероятность внезапных отказов.

Например, порядка 720000 мостов в Европе на данный момент осматриваются преимущественно визуально [10]. В тоже время, в работе коллектива авторов под руководством Мохаммади М., предложена методика оценки состояния моста с использованием его точной модели цифрового двойника, сформированной на основе наземного лазерного сканирования и данных BIM. Эта модель включала как геометрическую, так и негеометрическую информацию об элементах моста [11].

Ряд исследований подтверждает высокую эффективность ЦД при обеспечении технической безопасности строительных объектов и персонала и управления рисками. Так, разработаны фреймворки цифровых двойников для управления рисками при осуществлении операций по подъёму грузов на высоту. Например, коллектив авторов под руководством Цян В. создал модель цифрового двойника, способную с высокой степенью реалистичности имитировать поведение башенных кранов [12].

Ещё одно направление исследований связано с использованием цифровых двойников для мониторинга перемещений и действий рабочих с целью выявления потенциальных угроз и оперативного их устранения.

В настоящее время разработана система визуального мониторинга действий персонала в режиме реального времени. Система информирует рабочих о реальных и потенциальных угрозах, что снижает вероятность возникновения несчастных случаев [13].

Технология цифровых двойников оказывает значительное влияние на повышение энергоэффективности зданий и сооружений. Массовое внедрение данной технологии позволяет участникам строительного процесса принимать обоснованные решения, оптимизировать эксплуатационные характеристики зданий и вносить вклад в построение более экологически устойчивого будущего.

Внедрение ЦД также позволяет усовершенствовать управление качеством работ и услуг в строительной отрасли. Например, коллектив авторов, под руководством Коссе С. разработали фреймворк на основе цифрового двойника для производства сборных железобетонных элементов, реализованный в концепции Индустрия 4.0. Это позволило существенно повысить обоснованность принимаемых решений и качество производимого продукта [14].

Технология ЦД позволяет существенно улучшить управление цепочками поставок и логистики в строительной отрасли. Так, Ли Д. и Ли С. предложили использовать для компаний, осуществляющих модульное строительство, цифровых двойников для мониторинга и моделирования логистических процессов в режиме реального времени. Разработанная технология представляла собой виртуальную объектно-ориентированную модель строительного объекта модель физических объектов на базе геоинформационной системы. Согласно расчётным данным, это позволило повысить точность расчёта времени прибытия техники и сократить ее простой на 157,5 часов [15].

Однако, несмотря на огромный потенциал технологии цифровых двойников не нашли еще широкого внедрения в строительной отрасли. Это связано с объективными и субъективными факторами, приведенными ниже.

Беспрепятственный обмен данными между физическим объектом и его виртуальной моделью является неотъемлемым условием функционирования цифрового двойника. В то же время, от IoT-датчиков поступают различные типы данных: изображения, звук, видеоматериалы, координаты, технические параметры и т.д. Это требует применения методов объединения мономодальной информации [2].

Для решения этой проблемы необходимо сосредоточить внимание на разработке стандартизованных форматов данных, протоколов и интерфейсов программирования приложений (API), которые обеспечивают взаимодействие и обмен данными между различным программным обеспечением и пользователями.

Достоверность данных, используемых в ЦД, имеет первостепенное значение, поскольку они служат основой для анализа и принятия решений. Проблемы с качеством данных, такие как отсутствие или недостоверная информация, могут снизить адекватность модели ЦД, что приведёт к недостоверным результатам. Полнота данных также имеет ключевое значение, так как пробелы или недостающая информация могут нарушить целостность модели ЦД.

Методы контроля качества данных, такие как очистка данных и верификация, позволяют повысить точность и достоверность информации, используемой в ЦД. Такой комплексный подход обеспечивает целостное представление физического объекта или системы, что позволяет выполнять более точные симуляции и анализ.

Второе ограничение связано с масштабируемостью и сложностью данных. Под масштабируемостью принято понимать способность ЦД адаптироваться к крупномасштабным строительным проектам и сложной инфраструктуре при сохранении оптимальной производительности [16].

Для решения данной проблемы необходимо разрабатывать надёжные системы и инфраструктуру, способные эффективно обрабатывать возрастающие объёмы данных, генерируемых ЦД, например, такие как облачные вычисления.

Третья проблема, с которой сталкиваются строительные компании при внедрении ЦД, является необходимость соблюдения конфиденциальности и безопасности информации.

Для преодоления этих проблем требуется разработка и реализация комплексных протоколов защиты данных и механизмов шифрования. Это предполагает использование современных технологий и практик в области кибербезопасности для снижения потенциальных рисков. Кроме того, введение механизмов контроля доступа, процедур аутентификации и разграничения прав пользователей способствует ограничению доступа только для уполномоченных лиц или организаций, что укрепляет общую безопасность экосистемы ЦД [17].

Дополнительно, в качестве препятствия для широкого применения технологии ЦД в строительстве можно выделить проблемы, связанные с их стоимостью. Внедрение цифрового двойника сопряжено с высокими стартовыми инвестициями, затратами на сбор и интеграцию данных, вопросами масштабирования, технического обслуживания и обновлений, а также потребностью в квалифицированных кадрах [2].

Таким образом, как показал проведенный анализ, технология цифрового двойника в строительной отрасли используется при выполнении одного из приведенных ниже бизнес-процессов:

- виртуальное проектирование;
- планирование и управление проектами;
- управление зданиями и сооружениями и их техническое обслуживание;
- обеспечение мер безопасности;
- обеспечение энергоэффективности;
- контроль и управление качеством;
- управление цепочками поставок и логистика;
- мониторинг технического состояния конструкций.

В тоже время, повсеместное внедрение технологии цифрового двойника сдерживается наличие следующих ограничений:

- сложность объединения многомодальной информации,
- точность и полнота данных,
- масштабируемость и сложность данных,
- обеспечение конфиденциальности и безопасности информации,
- отсутствие единых стандартов и механизмов управления данными.

Список источников

1. Низкая строительная производительность и как ее повысить [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gectaro.com/blog/tpost/s0ykyhy3g1-nizkaya-stroitelnaya-proizvoditelnost-i> – Загл. с экрана. – Яз.рус. (дата обращения: 06.07.2025).
2. Shafto M., Conroy M., Doyle R., Glaessgen E., Kemp C., LeMoigne J., Wang L. NASA Technology Roadmap: Modeling, Simulation. Information Technology & Processing Roadmap. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2012. 38 р.
3. Digital Twins: Technology, Use Cases, and Implementation Tips [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.altexsoft.com/blog/digital-twins/> – Загл. с экрана. – Яз.рус. (дата обращения: 06.07.2025).
4. Omrany, H., Al-Obaidi, K.M., Husain, A., Ghaffarianhoseini, A. Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions. *Sustainability* 2023, 15, 10908. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/14/10908>
5. Airports International. Case Study: Digital Twinning in Construction 2022. URL: <https://www.airportsinternational.com/article/case-study-digital-twinning-construction> (дата обращения: 21.06.2025)
6. Ozturk G. B. Digital Twin Research in the AECO-FM Industry // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 40. P. 102730. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102730
7. Xie H., Xin M., Lu C., Xu J. Knowledge map and forecast of digital twin in the construction industry: State-of-the-art review using scientometric analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 383. P. 135231. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135231.
8. Lu R., Brilakis I. Digital twinning of existing reinforced concrete bridges from labelled point clusters // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 105. P. 102837. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102837.
9. Jiang Y., Liu X., Wang Z., Li M., Zhong R. Y., Huang G. Q. Blockchain-enabled digital twin collaboration platform for fit-out operations in modular integrated construction // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 148. P. 104747. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104747
10. Hüthwohl P., Lu R., Brilakis I. Multi-classifier for reinforced concrete bridge defects // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 105. P. 102824. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102824.
11. Mohammadi M., Rashidi M., Yu Y., Samali B. Integration of TLS-derived Bridge Information Modeling (BrIM) with a Decision Support System (DSS) for digital twinning and asset management of bridge infrastructures // *Computers in Industry*. 2023. Vol. 147. P. 103881. DOI: 10.1016/j.compind.2023.103881.
12. Jiang W., Ding L., Zhou C. Digital twin: Stability analysis for tower crane hoisting safety with a scale model // *Automation in Construction*. 2022. Vol. 138. P. 104257. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104257.
13. Wu S., Hou L., Zhang G. K., Chen H. Real-time mixed reality-based visual warning for construction workforce safety // *Automation in Construction*. 2022. Vol. 139. P. 104252. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104252
14. Kosse S., Vogt O., Wolf M., König M., Gerhard D. Digital Twin Framework for Enabling Serial Construction // *Frontiers in Built Environment*. 2022. Vol. 8. P. 864722. DOI: 10.3389/fbui.2022.864722.

15. Lee D., Lee S. Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, No. 13. P. 5909. DOI: 10.3390/app11135909.
16. Al-Obaidi K. M., Hossain M., Alduais N. A. M., Al-Duais H. S., Omrany H., Ghaffarianhoseini A. A Review of Using IoT for Energy Efficient Buildings and Cities: A Built Environment Perspective // Energies. 2022. Vol. 15, No. 16. P. 5991. DOI: 10.3390/en15165991
17. Alshammari K., Beach T., Rezgui Y. Cybersecurity for digital twins in the built environment: Current research and future directions // Journal of Information Technology in Construction. 2021. Vol. 26. P. 159-173. DOI: 10.36680/j.itcon.2021.010.

Сведения об авторах

Бойкова Анна Викторовна, доцент, Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия.

Витяхова Юлия Владимировна, старший преподаватель, Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия

Information about the authors

Boykova Anna Viktorovna, Associate Professor, Tver State Technical University, Tver, Russia.

Vityakhova Yulia Vladimirovna, senior teacher, Tver State Technical University, Tver, Russia