

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 2 / 2024, Vol. 16, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/12SAVN224.pdf>

2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Коротеев, Д. Д. Перспективы применения цифровых двойников в строительной отрасли / Д. Д. Коротеев, А. А. Ким, А. О. Васютин // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 2. — URL:

<https://esj.today/PDF/12SAVN224.pdf>

For citation:

Koroteev D.D., Kim A.A., Vasiutin A.O. Prospects for the application of digital twins in the construction industry. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(2): 12SAVN224. Available at: <https://esj.today/PDF/12SAVN224.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 69.002.5

Коротеев Дмитрий Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

Доцент

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: KoroteevMGSU@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9896-3555>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=708602

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=24481588600>

Ким Анастасия Андреевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

E-mail: a.kkim@mail.ru

Васютин Антон Олегович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

E-mail: Vao_work@mail.ru

Перспективы применения цифровых двойников в строительной отрасли

Аннотация. Высокий рост уровня строительства обуславливается быстрыми темпами развития различных инновационных технологий. Сложные и масштабные проекты требуют современных подходов, так как традиционные методы становятся неэффективными в нынешних условиях строительства и вызывают задержки, удорожание и простои проекта. Цифровизация и совершенствование технологий позволяют решать огромный ряд проблем и предотвращать возможные риски, разрабатывая и оптимизируя решения для возникающих сложностей. Одним из примеров таких технологий являются цифровые двойники (Digital Twin), которые рассматриваются в данной статье.

В статье представлено сравнение технологии цифровых двойников и технологии информационного моделирования (ТИМ), выявлены их основные различия. Рассматривается упрощенная схема этапов работы цифровых двойников, а также в работе представлен обзор на классификацию виртуальных двойников по различным характеристикам: по типу двойника (Digital Twin Prototype (DTP), Digital Twin Instance (DTI) и Digital Twin Aggregate (DTA), по уровням двойников (Pre-Digital Twin, Digital Twin, Adaptive Digital Twin и Intelligent Digital

Twin) и по видам в зависимости от степени интеграции (Digital Model, Digital Shadow и Digital Twin). Производится анализ технологии цифровых близнецов по их функциям на основных этапах жизненного цикла объекта строительства (стадии проектирования, строительства и эксплуатации). Приводятся примеры ряда организаций на российском рынке, которые внедряют инновационные технологии двойников в свою деятельность, а также проанализировано использование технологий цифровых двойников на конкретном примере строительного объекта в Российской Федерации.

Ключевые слова: цифровой двойник; строительная отрасль; цифровые информационные технологии; цифровая информационная модель; цифровая тень; технологии информационного моделирования; цифровизация

Введение

Строительная сфера в наши дни не стоит на месте и стремительно претерпевает изменения, которые можно связать с ростом требований стандартизации и огромными объемами строительства новых и уникальных объектов инфраструктуры, что как следствие привело к такому решению, как цифровизация, внедрение передовых цифровых информационных технологий [1].

Создание цифровых двойников — это революционная концепция, которая активно набирает обороты в настоящее время и позволяет создавать цифровые копии реальных объектов (зданий, сооружений и пр.), а также значительно упрощать различные задачи для всех участников строительства.

Цифровые двойники представляют собой сложную виртуальную модель, отражающую постоянно обновляющиеся физические структуры объекта в режиме реального времени, основой для создания которой послужили такие технологии, как технологии информационного моделирования (ТИМ), Internet of Things (IoT) и искусственный интеллект (ИИ).

Однако показатели внедрения ЦИМ в строительную структуру РФ не высоки. Формирование нормативных документов началось ещё в 2014 году, но первые ГОСТы и СП приняли только в 2017 году, например, ГОСТ Р 57310-2016, ГОСТ Р 57563-2017 и т. д. [2].

Целью данной научной статьи является анализ технологии цифровых двойников и технологии информационного моделирования, применяемых в строительстве.

Объектом исследования являются цифровые технологии, применяемые в строительной отрасли при проектировании и строительстве зданий и сооружений различного назначения.

Предметом исследования являются ТИМ и цифровые двойники, которые можно использовать как на стадии проектирования, так и на стадии строительства жизненного цикла строительных объектов.

Основная часть

«Модель зеркальных пространств» — так назвал профессор Мичиганского университета Майкл Гривс концепцию цифрового двойника в своей работе ещё в 2002 году. В одной из своих ранних публикаций Гривс дал менее абстрактное определение цифрового двойника, состоящей из трех основных аспектов:

1. Физический объект в реальной среде.
2. Цифровая модель в виртуальной среде.
3. Данные и сведения, объединяющие цифровую модель и физический объект.

Однако теоретические исследования Гривса цифрового двойника не применялись в практической деятельности в связи с тем, что в то время уровень развития технологий был недостаточным для этих целей [3].

Создание цифрового двойника состоит из нескольких этапов:

1. Анализ будущего объекта строительства.
2. Моделирование копии объекта (ЦИМ или лазерное сканирование).
3. Разработка проекта и его тестирование.
4. Запуск цифрового двойника.
5. Налаживание процессов при строительстве объекта.

Моделирование копии объекта производится в основном двумя способами — ЦИМ или лазерным сканированием. Цифровая информационная модель создается на стадии проектирования, а затем конкретизируется и корректируется при авторском контроле. При использовании лазерного сканирования создается цифровая модель-слепок, которая служит основой для дальнейшего моделирования отдельных элементов [4].

Упрощенная схема работы цифрового двойника включает в себя [5]:

- Сбор данных со всех систем в режиме реального времени.
- Обработка и анализ информации, создание ТИМ-модели.
- Осуществление доступа ко всей информации по объекту через интерфейс программы.

Схема этапов работы цифровых близнецов представлена на рисунке 1 [6].



Рисунок 1. Схема этапов работы цифрового двойника

Первым этапом создания любого цифрового двойника является внедрение основного источника информации — ТИМ-модели [7].

Технологии информационного моделирования и цифровые двойники тесно связаны между собой, имея общие цели — улучшение координации участников проекта, повышение качества, а также производительности работ участников строительства, однако ТИМ не является цифровым двойником, но является его незаменимой частью. Основные их отличительные характеристики представлены в таблице 1 [8].

Цифровой двойник представляет собой оцифрованную модель реального здания, который на основании данных и информации может корректироваться и развиваться в режиме реального времени [9].

Основная концепция технологий цифрового двойника представляет собой взаимосвязанную цифровую модель с физической копией объекта, которая корректируется и обновляется в режиме реального времени при любых изменениях в конструкции или прочих характеристиках

реального здания, а также при поступлении различной информации и данных о физическом объекте и проекте в целом [10].

Таблица 1

Основные отличительные характеристики ЦИМ и цифровых двойников

Характеристики	Цифровая информационная модель	Цифровой двойник
Использование информации	Для проектирования	Для управления процессами и персоналом
Модель здания	Исходная (проектная)	Цифровая копия, приближенная к реальному объекту
База данных	Функциональные компоненты частей здания	Отображение действий в режиме реального времени
Управление процессами	Не предназначен для оперативного управления	Оперативное управление процессами (т. к. используются данные объекта в режиме реального времени)
Прогнозы и риски	Отсутствуют	Возможность управления процессами
Информация об эксплуатации	Не отражает	Используется на стадии эксплуатации

Существует несколько вариантов использования цифровой модели [11]:

Вариант 1. Сбор и хранение данных и информации от физического объекта. Передача информации может происходить как в режиме реального времени, так и в оффлайн режиме. Цифровая модель полностью повторяет жизненный цикл объекта.

Вариант 2. Применение прототипа будущего объекта, то есть использование модели для тестирования до создания его физической копии.

Цифровые двойники подразделяются на четыре уровня [12; 13], представленные на рисунке 2 [14].

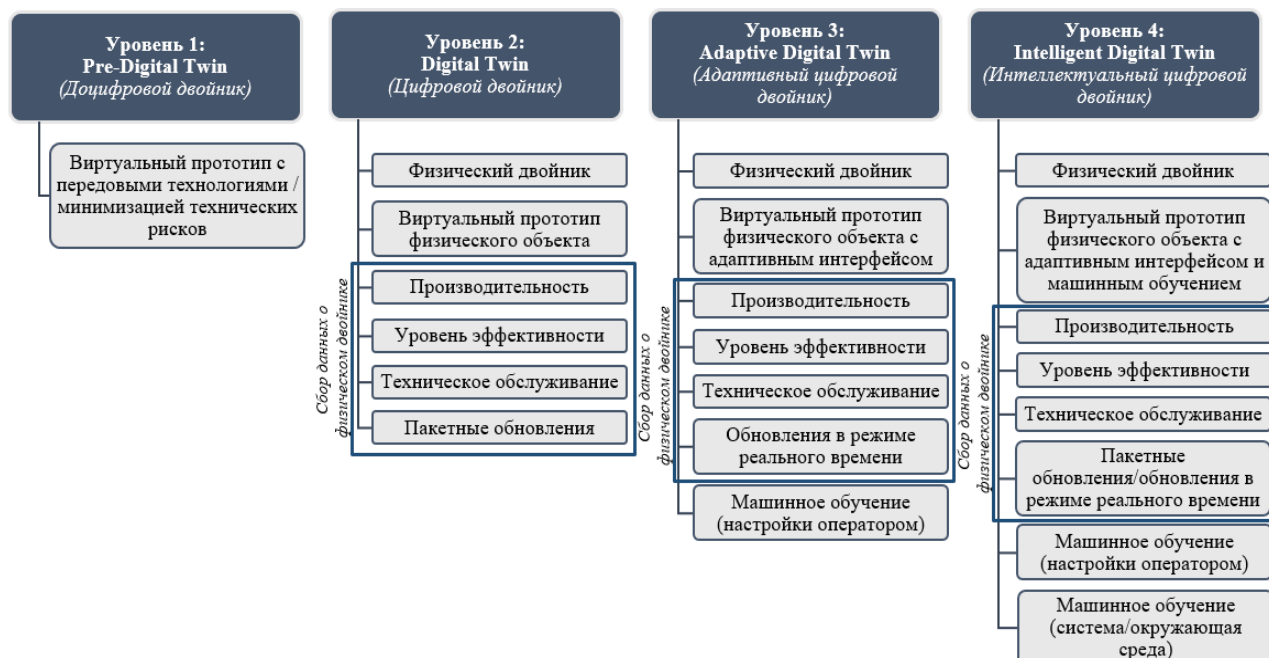


Рисунок 2. Классификация по уровням цифровых двойников

Уровень 1. Доцифровой двойник или цифровой двойник стадии проектирования — представляет собой цифровую модель с высокой точностью до этапа возведения физического объекта.

Уровень 2. Цифровой двойник — представляет собой классическую версию двойника, у которой в отличие от доцифрового двойника появляется фактический физический объект.

Уровень 3. Адаптивный цифровой двойник — двойник на данном уровне, помимо наличия физического объекта, использует алгоритмы машинного обучения на основе искусственного интеллекта, позволяющие ему учитывать предпочтения человека. Цифровая модель регулярно обновляется при получении новых данных и информации от физического двойника.

Уровень 4. Интеллектуальный цифровой двойник — это наивысший уровень двойника, который обладает всеми возможностями двойника предыдущего уровня, а также имеет способность использования машинного обучения без вмешательства человека, т. е. самостоятельно распознает предметы. Цифровой близнец на данном уровне представляет собой самостоятельную высокотехнологичную модель со способностью более детального анализа информации, получаемого от физического объекта.

Классификация по типу Гривса цифровых двойников представляет собой разделение на Digital Twin Prototype (DTP), Digital Twin Instance (DTI) и Digital Twin Aggregate (DTA) [15], представленные на рисунке 3 [16].

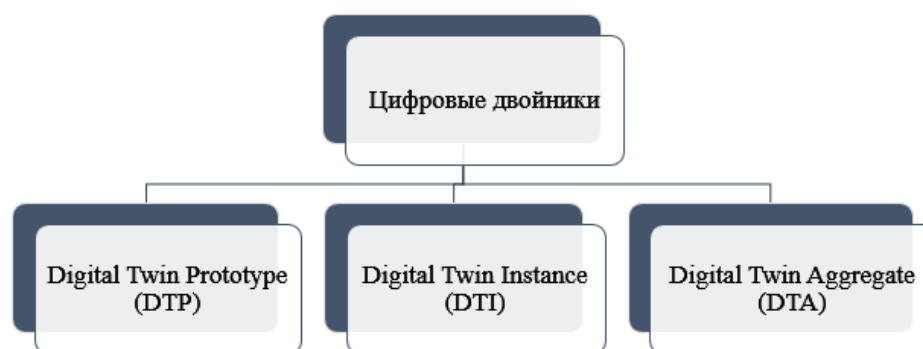


Рисунок 3. Классификация цифровых двойников по типу Гривса

DTP — это прототип физического объекта, содержащий и хранящий в себе все необходимые данные для строительства объекта, например, 3D-модели, спецификации и т. д.

DTI — это экземпляр, описывающий все характеристики физического объекта и связанный с физическим объектом на протяжении всего срока эксплуатации.

DTA — это агрегированный двойник, объединяющий цифровую копию и реальный объект, а также позволяющий управлять и обмениваться данными в единой облачной системе.

В зависимости от степени интеграции, эволюцию цифрового двойника можно классифицировать [17]:

1. Digital Model (Цифровая модель) — это объект в цифровом формате, который представляет собой существующий по факту или будущий объект строительства. Основное отличие данной модели заключается в отсутствии связи с реальным объектом.
2. Digital Shadow (Цифровая тень) — представляет собой связанные данные между физическим объектом и цифровой копией. При любых изменениях реального объекта цифровая тень также вносит коррективы.
3. Digital Twin (Цифровой двойник) — при полной интеграции потока информации в обоих направлениях между реальным объектом и виртуальной копией.

Взаимодействие физического и виртуального двойников представлено на рисунке 4 [18].

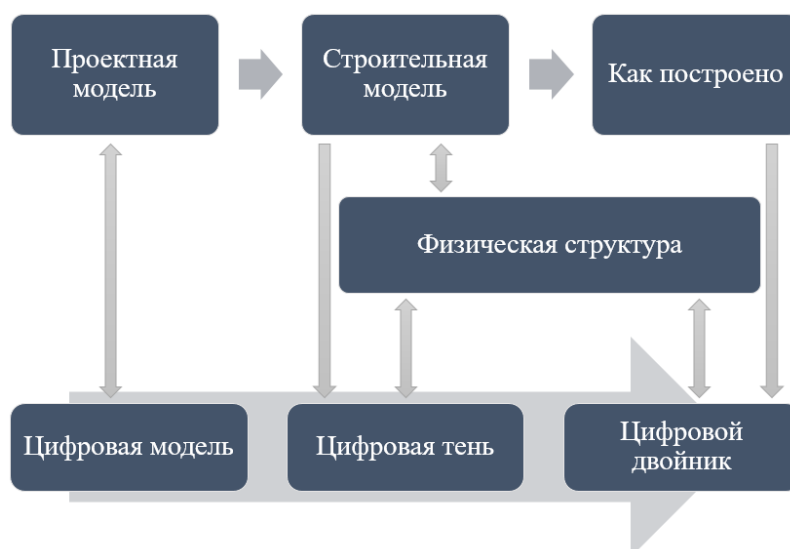


Рисунок 4. Взаимодействие физического и виртуального двойников

На разных стадиях жизненного цикла объекта цифровой двойник имеет различные функции, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Цифровой двойник на этапах жизненного цикла ()

Стадия проектирования	Стадия строительства	Стадия эксплуатации
— Подбор наиболее оптимальных конструктивных схем — Систематизация данных, анализ	— Определение требуемых допусков — Управление процесса строительства дистанционно	— Регулярное обновление данных о текущем состоянии объекта — Анализ информации и выявление проблем в инженерных системах

Составлено автором

По состоянию на 2023 год, компании, внедряющие цифровые двойники в Российской Федерации — это крупнейшие компании по строительству жилых зданий, такие как ГК «ПИК», ГК «Самолет», ПАО «Группа ЛСР», ГК «Эталон», АО «СК Донстрой» и другие. В основном использование двойников производится на стадии проектирования, однако ГК «ПИК» и АО «СК Донстрой» интегрировали облачных цифровых близнецов на стадии строительства на частных объектах.

Невозможность в полной мере оценить использование технологий цифрового двойника обуславливается тем, что использование технологии на данный момент времени ограничивается стадией проектирования, однако можно провести оценку на частном примере, где удалось задействовать двойника на стадиях помимо проектирования.

Рассмотрим внедрение цифрового двойника на реальном примере российского проекта компании «СтройИнновация» в городе Москва.

ЖК «Новый Горизонт» — это многофункциональный жилой комплекс комфорт класса, имеющий три высотные башни с современными системами коммуникаций, инфраструктурой и благоустройством зеленых зон.

В результате внедрения и использования технологии цифрового двойника сроки строительства были сокращены на 10 %, затраты уменьшены на 15 %, а повышение эффективности использования ресурсов достигло 12 %. Экономическая выгода данного проекта составила порядка 23 миллионов рублей [19].

Данные численные показатели проекта доказывают эффективность внедрения цифрового двойника.

Ещё одним ярким примером использования технологии цифрового двойника в мире является реставрация собора Парижской Богоматери после пожара в апреле 2019 года. С помощью данных, собранных лазерным сканером до пожара и после была сформирована цифровая модель храма, которая послужила ключевым аспектом для восстановления собора. Общая облачная платформа позволила инженерам, реставраторам и всех заинтересованным лицам получать всю необходимую информацию и данные в режиме реального времени, а также разработать грамотные решения по восстановлению Нотр-Дам-де-Пари [20].

Заключение

Цифровые двойники представляют собой смену парадигмы в строительной сфере. Однако эти прогрессивные инновационные цифровые технологии используются в строительной деятельности Российской Федерации ещё не в полном объеме своих возможностей, но несмотря на это уже доказывают необходимость внедрения на отдельных примерах, сокращая сроки строительства, затраты и прочие важные характеристики.

Уровень исследований и разработок цифровых близнецов в настоящее время отображают незаменимость использования технологий для выполнения строительных процессов и работ с беспрецедентной точностью и адаптивностью, об этом говорят огромное количество исследований и научных статей.

В ходе данного научного исследования было проведено сравнение технологии цифровых двойников и технологии информационного моделирования, их основные отличия, а также подробно рассмотрена классификация цифровых двойников по типам Гривса, по 4-м уровням зрелости и по их видам. Рассмотрена технология цифровых близнецов на основных стадиях жизненного цикла строительного объекта.

Приведенные в статье примеры внедрения технологии цифровых двойников служат доказательством своей эффективности в строительной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голядкина А.Д., Субботин Д.П., Красникова А.Н., Бугаевский Д.О. Цифровые двойники в строительстве // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2023. № 4(33). С. 17–21.
2. Гопкало В.Н., Пиотрович А.А. Обзор состояния нормативной базы внедрения информационного моделирования зданий и сооружений // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XX веке. — 2020. — № 1. — С. 403–407.
3. Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4. — С. 35–43, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-35>.
4. Valerian Vanessa Tuhaise, Joseph Handibry Mbatu Tah, Fonbeyin Henry Abanda Technologies for digital twin applications in construction // Automation in Construction. — 2023. — Vol. 152, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104931>.

5. Rolando Chacón, Hector Posada, Carlos Ramonell, Manuel Jungmann, Timo Hartmann, Rehan Khan, Rahul Tomar Digital twinning of building construction processes. Case study: A reinforced concrete cast-in structure // Journal of Building Engineering. — 2024. — Vol. 84, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108522>.
6. De-Graft Joe Opoku, Srinath Perera, Robert Osei-Kyei, Maria Rashidi, Keivan Bamdad, Tosin Famakinwa Digital twin for indoor condition monitoring in living labs: University library case study // Automation in Construction. — 2024. — Vol. 157, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105188>.
7. Ammar A., Nassereddine H., AbdulBaky N., AbouKansour A., Tannoury J., Urban H. and Schranz C. Digital Twins in the Construction Industry: A Perspective of Practitioners and Building Authority. // Front. Built Environ. — 2022, 8: 834671. DOI: 10.3389/fbuil.2022.834671
8. Крюков К.М., Шаповалов А.В. Использование технологии цифровых двойников в строительстве // Инженерный вестник Дона. — 2022. — № 5(89). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-tehnologii-tsifrovyyh-dvoinikov-v-stroitelstve> (дата обращения: 20.05.2024).
9. Иванова И.Б., Васильева А.Ю. «Цифровой двойник» здания: отличие от BIM-технологий, источники эффективности применения в жилищно-коммунальном хозяйстве // Социально-экономическое управление: теория и практика. — 2021. — № 2(45). — С. 43–49, DOI: 10.22213/2618-9763-2021-1-43-49.
10. Есмагамбетов Т.У., Шиккульская О.М. Моделирование трехуровневой системы управления процессами экстренного реагирования // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал — Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2019. № 4(30). С. 118–124.
11. Абазьева М.П. Цифровые двойники: концепция, возможности, перспективы // Наука и бизнес: пути развития. — 2019. — № 5(95). — С. 210–212.
12. Ежкина Л.В., Курбатов В.Л. Применение технологии цифровых двойников в строительстве // Университетская наука. — 2022. — № 2(14). — С. 51–53.
13. Jueru Huang, Dmitry D. Koroteev, Marina Rynkovskaya. Machine learning-based demand response in PV-based smart home considering energy management in digital twin // Solar Energy. 2023. — Vol. 252, pp. 8–19. doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.044.
14. Azad M. Madni, Carla C. Madni and Scott D. Lucero Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering // Systems. — 2019. — Vol. 7, DOI:10.3390/systems7010007.
15. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2021. — № 7. — С. 517–531 DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531.
16. Барабанова Т.А., Балалов В.В., Блинова О.С. Применение технологии «цифровых двойников» при эксплуатации зданий и сооружений // Construction and Architecture. — 2022. — № 2(35). — С. 110–113, DOI 10.29039/2308-0191-2022-10-2-81-85.

17. Фролов Е.Б., Климов А.С., Зин Мин Хтун Цифровой двойник производственной системы на основе программного обеспечения категории MES // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2018. — № 12(73). — С. 66–73, DOI: 10.30987/article_5c0f808e9b29f7.40393956.
18. Yvan Tchana, Guillaume Ducellier, Sébastien Remy Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management // Procedia CIRP. — 2019. — Vol. 84. — pp. 545–549, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.176>.
19. Красиков А.А. Применение технологии цифровой двойник при проектировании зданий // Наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации. — Пенза: наука и просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.) (Пенза), 2023. — с. 182–184.
20. Шемонаева А.А., Зеленина А.А. Исследование программного обеспечения 3D-технологий в решении научно-технических задач в архитектуре // 3D технологии в решении научно-практических задач. — Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (Красноярск), 2022. — С. 112–115.

Koroteev Dmitry Dmitrievich

National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
E-mail: KoroteevMGSU@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9896-3555>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=708602
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=24481588600>

Kim Anastasiia Andreevna

National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
E-mail: a.kkim@mail.ru

Vasiutin Anton Olegovich

National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
E-mail: Vao_work@mail.ru

Prospects for the application of digital twins in the construction industry

Abstract. The high growth in construction is due to the rapid pace of development of various innovative technologies. Complex and large-scale projects require modern approaches, as traditional methods become ineffective in the current construction environment and cause delays, cost increases and project downtime. Digitalization and improvements in technology can solve a huge range of problems and prevent potential risks by developing and optimizing solutions for the complexities that arise. One example of such technologies is Digital Twin, which is discussed in this paper.

The paper presents a comparison of digital twin technology and information modeling technology (IMT), reveals their main differences. A simplified scheme of the stages of digital twins' operation is considered, and also the paper presents an overview of the classification of virtual twins by various characteristics: by twin type (Digital Twin Prototype (DTP), Digital Twin Instance (DTI) and Digital Twin Aggregate (DTA), by twin levels (Pre-Digital Twin, Digital Twin, Adaptive Digital Twin and Intelligent Digital Twin) and by types depending on the degree of integration (Digital Model, Digital Shadow and Digital Twin). Digital Twin technology is analyzed by its functions at the main stages of the life cycle of the construction object (design, construction and operation stages). Examples of a number of organizations in the Russian market that implement innovative twin technologies in their activities are given, and the use of digital twin technologies is analyzed on a specific example of a construction project in the Russian Federation.

Keywords: digital twin; construction industry; digital information technologies; digital information model; digital shadow; information modeling technologies; digitalization