ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ МЕЖДУНАРОДНЫХ ОТНОШЕНИЙ (УНИВЕРСИТЕТ) МИНИСТЕРСТВА ИНОСТРАННЫХ ДЕЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

*На правах рукописи*

**Синицын Сергей Николаевич**

# ОПТИМИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Специальность 5.2.6. Менеджмент

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Научный руководитель:
доктор экономических наук, профессор
Завьялова Елена Борисовна

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ..... 3

ГЛАВА 1. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ..... 19

1.1. Цифровая трансформация как основа управления бизнес-процессами организации ..... 19

1.2 Концептуальные основы цифрового двойника как современного технологического тренда ..... 32

1.3 Типология, особенности, проблемы и перспективы развития технологии цифровых двойников ..... 60

ГЛАВА 2. ПРОЦЕССЫ ИНТЕГРАЦИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИЯМИ В РОССИЙСКОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ПРАКТИКЕ ..... 77

2.1. Особенности и перспективы развития российского рынка цифровых двойников ..... 77

2.2. Состояние зарубежного рынка цифровых двойников в современных условиях ..... 89

2.3. Ключевые вызовы рынка цифровых двойников ..... 106

ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ЦЕЛЯХ ОПТИМИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ..... 116

3.1. Российский и международный опыт внедрения цифровых двойников в перспективных отраслях ..... 116

3.2. Модернизация производственных мощностей и обеспечение безопасности ЦД ..... 132

3.3. Создание цифрового двойника университета ..... 157

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 186

БИБЛИОГРАФИЯ ..... 196

# ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования**. Цифровизация российской экономики — одна из стратегических задач развития нашей страны, прописанных в Едином плане по достижению национальных целей развития Российской Федерации на период до 2024 года и на плановый период до 2030 года, являющемся основным документом стратегического планирования в нашей стране. Конкретная реализация планов по цифровизации осуществляется в рамках Национального проекта «Цифровая экономика». Очевидно, что цифровизация экономики на уровне целой страны невозможна без цифровизации бизнеса. Однако на практике бизнес часто понимает цифровизацию только как переход на электронный документооборот и корпоративные информационные системы. Кроме того, цифровизация бизнеса требует довольно крупных затрат, обучения персонала, перестройки всех управленческих и производственных процессов в компании. Определение необходимых и достаточных технологий для цифровизации компании — ключевая задача руководства.

Цифровые двойники — это технология, которая может быть внедрена постепенно в структуры компании, может объединить в себе все существующие процессы, уменьшить расходы, сильно сократить временные и финансовые затраты на этапе планирования. Это та технология, которая поможет найти «узкие» места в производственном процессе и быстро нарастить объем производства, кроме того, цифровой двойник помогает сократить расходы на персонал, профилактические работы, сократить количество аварий и поломок оборудования, а, следовательно, увеличить чистую прибыль компании.[1]

Цифровой двойник — это технология со множеством функций. Он может использоваться на протяжении всего жизненного цикла актива, при необходимости даже появиться раньше, чем реальный объект, еще на этапе проектирования и

[1] Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства [Электронный ресурс] / Н.В. Курганова и др. // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Vol. 7, no. 5. — P. 105–115. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyh-dvoynikov-kak-odno-iz-klyuchevyh-napravleniy-tsifrovizatsii-proizvodstva?ysclid=luvfkxlsmt157138445 (дата обращения: 06.11.2025)

строительства. В этом случае двойник позволит протестировать новый объект, при необходимости скорректировать проект с наименьшими затратами и добиться максимальной точности при строительстве объекта.

В ходе развития проекта цифровой двойник совершенствуется вместе с объектом; он может пройти цикл от простой концептуальной модели до полноценного цифрового близнеца, способного во всех деталях отражать текущее состояние объекта, создавать новые возможности для управления операционной деятельностью.

Одна из ключевых задач, успешно решаемых при помощи цифрового двойника — это выбор оптимальной концепции производства. Цифровой двойник позволяет наглядно представить себе все возможные варианты, просчитать риски и потенциальные прибыли на несколько лет вперед и в результате привести владельцев бизнеса к наиболее эффективным решениям.[2] Цифровые двойники сегодня уже не редкость, они помогают автомобилестроителям перенастраивать производство при запуске обновленной модели автомобиля, авиастроителям они помогают тестировать элементы фюзеляжа и «проверять» работу силовых установок, на горнорудных предприятиях помогают управлять флотационными машинами и увеличивать их КПД.

В долгосрочной перспективе все цифровые продукты, которые компаниям удастся приобрести или развить сейчас, уже завтра обеспечат им значимое преимущество, независимо от того, как будет развиваться конкретная отрасль и рынок в целом.[3] В конкурентной борьбе вне зависимости от отрасли, побеждает тот, кто в момент кризиса думает на несколько ходов вперед и не прекращает по мере возможности наращивать конкурентные преимущества. Внедрение цифровых двойников — высокоэффективный способ повысить конкурентоспособность фирмы практически в любой сфере деятельности.

---

[2] Digital Twin Service towards Smart Manufacturing Procedia / Q. Qi et al. // CIRP. — 2018. — Vol. 72. — P. 237–242.

[3] Михайлюк М.В. Цифровые экосистемы предпринимательства в современных реалиях / М.В. Михайлюк // Финансовые исследования. — 2022. — №4(77). — С. 50–58.

**Научная проблема.** Технология цифровых двойников, успешно и активно применяемая при решении технических задач, обладает значительным, но недостаточно исследованным потенциалом для изменения подходов к принятию управленческих решений. Бизнес-процессы являются ключевым элементом операционной деятельности любой организации, а система управления ими определяет эффективность функционирования и конкурентоспособность. В условиях цифровой трансформации эта система претерпевает качественные изменения, связанные с появлением новых технологических инструментов, в том числе цифровых двойников, что требует переосмысления управленческих подходов, механизмов и моделей. Научная проблема сегодня состоит в отсутствии теоретически обоснованного и эмпирически верифицированного управленческого подхода к интеграции цифровых двойников в систему менеджмента организации, который бы определял организационно-управленческие механизмы, условия и факторы эффективного внедрения данной технологии для оптимизации бизнес-процессов, а также позволял оценивать управленческие эффекты от её применения. До настоящего времени не решены следующие противоречия: (1) между потенциалом технологии и зрелостью управленческих моделей - цифровые двойники требуют принципиально иной логики принятия решений (включая предиктивную), тогда как существующие модели управления бизнес-процессами не предусматривают механизмов интеграции виртуальных моделей в контур управления; (2) между технологической готовностью и организационной готовностью - внедрение цифровых двойников сопряжено с необходимостью трансформации организационной структуры, компетенций персонала, культуры принятия решений, однако управленческие условия такой трансформации исследованы фрагментарно; (3) между затратами на внедрение и измеримостью управленческих эффектов - отсутствует методический инструментарий оценки влияния цифровых двойников на ключевые показатели эффективности бизнес-процессов с позиции менеджмента.

**Степень разработанности проблемы.** Теоретическое осмысление понятия цифровая экономика содержится в работах Х. Донга[4], Х. Масторакиса[5], Н. Негропонте[6], Д. Тапскотта[7]. Среди российских ученых выделяются работы А.В. Бабкина и О.В. Чистяковой[8], Н.В. Городновой[9], В.В. Иванова и Г.Г. Малинецкого[10], А.Н. Макарова[11], А.В. Мухачевой[12], Б. Паньшина[13], П.С. Шпак, Е.Г. Сычева и Е.Е. Меринской.[14]

---

[4] Dong H. An Integrative View of the Concept of Digital Ecosystem / H. Dong, F. Khadeer Hussain, E. Chang [Электронный ресурс] // Third International Conference on Networking and Services, 2007. — URL: https://www.researchgate.net/publication/4314599_An_Integrative_view_of_the_concept_of_Digital_Ecosystem (дата обращения: 15.02.2025).

[5] Beyond the Internet of Things. Everything Interconnected / ed. by J.M. Batalla, G. Mastorakis, C.X. Mavromoustakis, E. Pallis. — Springer, 2017. — 408 p.

[6] Negroponte N. Being Digital / N. Negroponte. — Knopf Doubleday Publishing Group, 1995. — 272 p.

[7] Tapscott D. Digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence / D. Tapscott. — New York ; San Francisco, California ; Washington, D.C. : McGraw-Hill, 1995. — 342 p.

[8] Бабкин А.В. Цифровая экономика и ее влияние на конкурентоспособность предпринимательских структур / А.В. Бабкин, О.В. Чистякова // Российское предпринимательство. — 2017. — Т. 18. — № 24. — С. 4087–4102.

[9] Городнова Н.В. Развитие цифровой экономики: теория и практика [Электронный ресурс] / Н.В. Городнова // Вопросы инновационной экономики. – 2021. – №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-tsifrovoy-ekonomiki-teoriya-i-praktika (дата обращения: 16.04.2026).

[10] Иванов В.В. Цифровая экономика : мифы, реальность, перспектива / В.В. Иванов, Г.Г. Малинецкий. — Москва : Российская Академия наук, 2017. — 63 с.

[11] Макаров А.Н. О потенциале цифровой экономики в контексте форсайта экономической методологии и теории [Электронный ресурс] / А.Н. Макаров // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2022. – №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-potentsiale-tsifrovoy-ekonomiki-v-kontekste-forsayta-ekonomicheskoy-metodologii-i-teorii (дата обращения: 16.04.2026).

[12] Мухачёва А.В. Система категорий цифровой экономики: эволюция подходов [Электронный ресурс] / А.В. Мухачеа // Управленческие науки. – 2025. – №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-kategoriy-tsifrovoy-ekonomiki-evolyutsiya-podhodov (дата обращения: 16.04.2026).

[13] Паньшин Б. Цифровая экономика: понятия и направления развития [Электронный ресурс] / Б. Паньшин // Наука и инновации. – 2019. –№3 (193). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-ekonomika-ponyatiya-i-napravleniya-razvitiya (дата обращения: 16.04.2026).

[14] Шпак П.С. Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики [Электронный ресурс] / П.С. Шпак, Е.Г. Сычева, Е.Е. Меринская // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». — 2020. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-tsifrovyh-dvoynikov-kak-sovremennaya-tendentsiya-tsifrovoy-ekonomiki/viewer (дата обращения: 15.11.2025).

Изучением теоретических и практических вопросов цифровой трансформации заняты такие ученые как А. Прохоров и Л. Коник[15]. В этом блоке отдельного внимания заслуживают работы таких ученых как О.В. Дьяченко и Е.А. Истомина[16], Е.В. Купчишина[17], посвященные вопросам влияния цифровой трансформации на экономическую политику.

Теория и практика применения цифровых двойников в бизнес-процессах изложена в работах М. Гривса[18], Е. Глэссгена, Д. Штаргеля[19], Р. Зодерберга, Ф. Тао, Р.Н. Болтона и др.[20], Дж.Б. Ли, Х.А. Као[21], А. Эль Саддика[22], М.Т. Шмидта, М. Хинднсбо и М.С. Потгитера[23].

Среди отечественных ученых, занимающихся изучением цифровых двойников в категориях управленческой науки, следует выделить таких исследователей как

---

[15] Прохоров А. Цифровая трансформация : анализ, тренды, мировой опыт [Электронный ресурс] / А. Прохоров, Л. Коник. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : КомНьюс Груп, 2019. — 368 с. — URL: https://ацим.рф/wp-content/uploads/2021/09/digital_transformation_book.pdf (дата обращения: 15.10.2025).

[16] Дьяченко О.В., Истомина Е.А. Теоретические основы цифровой экономики в документах стратегического планирования [Электронный ресурс] / О.В. Дьяченко, Е.А. Истомина // Вестник ЧелГУ. – 2018. – №8 (418). – с. 98-102 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-osnovy-tsifrovoy-ekonomiki-v-dokumentah-strategicheskogo-planirovaniya (дата обращения: 16.04.2026)

[17] Купчишина Е.В. Эволюция концепций цифровой экономики как феномена неоэкономики [Электронный ресурс] / Е.В. Купчина // Государственное управление. Электронный вестник. – 2018. – №68. С. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-kontseptsiy-tsifrovoy-ekonomiki-kak-fenomena-neoekonomiki (дата обращения: 16.04.2026).

[18] Grieves M. Digital Twins, Simulation, and the Metaverse : Driving Efficiency and Effectiveness in the Physical World through Simulation in the Virtual Worlds / M. Grieves, E.Y. Hua. — Springer, 2002. — 445 p.

[19] Glaessgen E. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles [Электронный ресурс] / E. Glaessgen, D. Stargel // Paper for the 53rd Structural Dynamics and Materials Conference: Special Section on the Digital Twins. — 2012. — URL: http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2012-1818 (дата обращения: 02.10.2025).

[20] Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms [Электронный ресурс] / N. Ruth et al. // Journal of service management. — 2018. — Vol. 29 Issue 5. — P. 776–808. — URL: https://www.researchgate.net/publication/341251035_Customer_experience_challenges_bringing_together_digital_physical_and_social_realms (дата обращения: 15.02.2024).

[21] Lee J. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems / J. Lee, B. Bagheri, H.A. Kao // Manufacturing Letters. — 2015. — 3. — P. 18–23.

[22] El Saddik A. Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies / A. El Saddik // IEEE Multi Media. — 2018. — Vol. 25, no. 2. — P. 87–92.

[23] Potgieter M.C. Modeling and optimization of complex systems and processes / M.C. Potgieter // Scientific and technical journal from the company. — 2018. — No. 5. — P. 21–24.

Д.А. Сосфенов[24], П.С. Шпак, Е.Е. Сычева[25], Т.Г. Кротова[26], А. Прохоров, Л. Коник[27], А.В. Комраков, А.И. Сухоруков[28], Г.Б. Коровин[29], Н.В. Курганова, М.А. Филин, Д.С. Черняев, А.Г. Шаклеин, Д.Е. Намиот[30]. Оценкой влияния цифровых двойников на трансформацию и эффективность бизнес-процессов занимаются такие ученые как И.А. Стрелец[31], Е.С. Побдорнова[32], Д.Э. Ли[33].

---

[24] Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4. — С. 35–43. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-istoriya-vozniknoveniya-i-perspektivy-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.11.2025).

[25] Шпак П.С. Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики [Электронный ресурс] / П.С. Шпак, Е.Г. Сычева, Е.Е. Меринская // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». — 2020. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-tsifrovyh-dvoynikov-kak-sovremennaya-tendentsiya-tsifrovoy-ekonomiki/viewer (дата обращения: 14.11.2025).

[26] Кротова Т.Г. Применение цифровых двойников для борьбы с изменением климата странами — членами БРИКС / Т.Г. Кротова, Е.Б. Завьялова, С.Н. Синицын // Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. — 2025. — 27(1). — С. 167–180.

[27] Прохоров А. Цифровая трансформация : анализ, тренды, мировой опыт [Электронный ресурс] / А. Прохоров, Л. Коник. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : КомНьюс Груп, 2019. — 368 с. — URL: https://ацим.рф/wp-content/uploads/2021/09/digital_transformation_book.pdf (дата обращения: 15.10.2025).

[28] Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства [Электронный ресурс] / Н.В. Курганова и др. // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Vol. 7, no. 5. — P. 105–115. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyh-dvoynikov-kak-odno-iz-klyuchevyh-napravleniy-tsifrovizatsii-proizvodstva/viewer (дата обращения: 06.11.2025).

[29] Коровин Г.Б. Возможности применения цифровых двойников в промышленности / Г.Б. Коровин // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2021. — 27(8). — С. 124–133.

[30] Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства [Электронный ресурс] / Н.В. Курганова и др. // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Vol. 7, no. 5. — P. 105–115. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyh-dvoynikov-kak-odno-iz-klyuchevyh-napravleniy-tsifrovizatsii-proizvodstva/viewer (дата обращения: 06.11.2025).

[31] Стрелец И.А. Перспективы модификации поведения экономических агентов в глобальной информационной системе / И.А. Стрелец // Перспективы экономической глобализации: монография / под ред. А.С. Булатова. — Москва : КНОРУС, 2019. — С. 255–272.

[32] Подборнова Е.С. Влияние цифровых двойников на оптимизацию бизнес-процессов промышленных предприятий /[Электронный ресурс] / Е.С. Подборнова // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2024. – №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tsifrovyh-dvoynikov-na-optimizatsiyu-biznes-protsessov-promyshlennyh-predpriyatiy (дата обращения: 18.04.2026).

[33] Ли Д.Э. Теоретические основы развития производства на предприятиях с использованием цифровых технологий [Электронный ресурс] / Д.Э. Ли // Raqamli iqtisodiyot (Цифровая экономика). 2025. №10. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-osnovy-razvitiya-proizvodstva-na-predpriyatiyah-s-ispolzovaniem-tsifrovyh-tehnologiy (дата обращения: 16.04.2026).

Анализу ограничений и сложностей адаптации цифровых двойников на предприятиях посвящены работы Э.С. Гасанова[34], Т.А. Кузовковой и В.Р. Ермолаевой[35], Н.В. Ноакк, С.Н. Ларина и Т.С. Лариной[36], В.Г Пичугина[37], Я. Се и Д.В. Круглова[38].

Для целей настоящего исследования актуальны статьи и публикации, посвящённые специфике применения цифровых двойников и других цифровых технологий в различных отраслях. Среди наиболее значимых следует выделить работы А.А. Бессарабовой и Н.О. Балязина[39], А.М. Грешонкова[40], М.П.

---

[34] Гасанов Э.С. Оценка развития цифровой экономики в корпоративной предпринимательской среде [Электронный ресурс] / Э.С. Гасанов // Human Progress. – 2022. – №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-razvitiya-tsifrovoy-ekonomiki-v-korporativnoy-predprinimatelskoy-srede (дата обращения: 16.04.2026).

[35] Кузовкова Т. А., Ермолаева В. Р. Анализ и развитие подходов к формированию стратегии реализации цифровых продуктов и сервисов [Электронный ресурс] / Т.А. Кузовкова, В.Р. Ермолаева // Экономика и качество систем связи. – 2024. – №2 (32). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-razvitie-podhodov-k-formirovaniyu-strategii-realizatsii-tsifrovyh-produktov-i-servisov (дата обращения: 16.04.2026).

[36] Ноакк Н. В., Ларин С. Н., Ларина Т. С. Комплексная модель доверия пользователей к продуктам цифровой экономики с учетом категорий социальных представлений и адаптации /[Электронный ресурс] / Н.В. Ноакк, С.Н. Ларин, Т.С. Ларина // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – №10-2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-model-doveriya-polzovateley-k-produktam-tsifrovoy-ekonomiki-s-uchetom-kategoriy-sotsialnyh-predstavleniy-i-adaptatsii (дата обращения: 16.04.2026).

[37] Пичугин В.Г. Адаптационная функция экономического поведения в условиях цифровой экономики [Электронный ресурс] / В.Г. Пичугин // АНИ: педагогика и психология. – 2020. – №4 (33). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/adaptatsionnaya-funktsiya-ekonomicheskogo-povedeniya-v-usloviyah-tsifrovoy-ekonomiki (дата обращения: 16.04.2026).

[38] Се Я., Круглов Д.В. Эффективность труда в условиях развития цифровой экономики // Экономика труда. – 2024. – №9. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-truda-v-usloviyah-razvitiya-tsifrovoy-ekonomiki-1 (дата обращения: 16.04.2026).

[39] Бессарабова А.А., Балязин Н.О. Теоретический базис развития предприятий сервиса в условиях цифровых экосистем [Электронный ресурс] / А.А. Бессарабова, Н.О. Балязин // Прикладные экономические исследования. – 2026. – №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskiy-bazis-razvitiya-predpriyatiy-servisa-v-usloviyah-tsifrovyh-ekosistem (дата обращения: 16.04.2026).

[40] Грешонков А. М. Стратегия модернизации сельского хозяйства в условиях перехода к цифровой экономике [Электронный ресурс] / А.М. Грешонков // Организатор производства. – 2022. – №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/strategiya-modernizatsii-selskogo-hozyaystva-v-usloviyah-perehoda-k-tsifrovoy-ekonomike (дата обращения: 16.04.2026).

Калиниченко[41], С.В. Кожемяко, Э.С. Алпатовой, Г.Ф. Муртазиной[42], Л.В. Поповой, М.С. Лата, П.А. Мелихова[43], О.Н. Римской и И.В. Анохова[44], Д.А. Семенова[45], Р.В. Хуриева[46].

Анализу бизнес-моделей на основе цифровых технологий посвящены труды таких авторов как М.О. Искоков, А.Д. Немцев, А.А. Шерстобитова[47], С.В. Курегян

[41] Калиниченко М.П. Моделирование «цифрового» фактора в промышленности России [Электронный ресурс] / М.П. Калиниченко // Экономическое развитие России. – 2021. – №6. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-tsifrovogo-faktora-v-promyshlennosti-rossii (дата обращения: 16.04.2026).

[42] Кожемяко С.В., Алпатова Э.С., Муртазина Г.Ф. Роль цифровых платформ в изменении структуры отраслевых рынков [Электронный ресурс] / С.В. Кожемяко, Э.С. Алпатова, Г.Ф. Муртазина // Московский экономический журнал. – 2025. – №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-tsifrovyh-platform-v-izmenenii-struktury-otraslevyh-rynkov (дата обращения: 16.04.2026).

[43] Попова Л.В., Лата М.С., Мелихов П.А. Цифровизация как драйвер устойчивого развития аграрной экономики региона [Электронный ресурс] / Л.В. Попова, М.С Лата, П.А. Мелихов // Вестник Адыгейского государственного университета. – Серия 5: Экономика. – 2022. – №1 (295). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-kak-drayver-ustoychivogo-razvitiya-agrarnoy-ekonomiki-regiona (дата обращения: 16.04.2026).

[44] Римская О. Н., Анохов И. В. Цифровые двойники и их применение в экономике транспорта [Электронный ресурс] / О.Н. Римская, И.В. Анохов // СРРМ. – 2021. – №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-i-ih-primenenie-v-ekonomike-transporta (дата обращения: 16.04.2026).

[45] Семенов Д.А. Параметры эффективности цифровой трансформации социальной сферы [Электронный ресурс] / Д.А. Семенов // Журнал прикладных исследований. – 2024. – №8. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-effektivnosti-tsifrovoy-transformatsii-sotsialnoy-sfery (дата обращения: 16.04.2026).

[46] Хуриев Р.В. Перспективы цифровой трансформации системы высшего образования в современных условиях [Электронный ресурс] / Р.В. Хуриев // РППЭ. – 2021. – №12 (134). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-tsifrovoy-transformatsii-sistemy-vysshego-obrazovaniya-v-sovremennyh-usloviyah (дата обращения: 16.04.2026)

[47] Искосков М.О., Немцев А.Д., Шерстобитова А.А., Радионов М.Г. Влияние инструментов стратегического планирования на эффективность функционирования бизнес-моделей предприятий промышленности [Электронный ресурс] / М.О. Искосков, А.Д. Немцев, М.Г. Радионов // Вестник ВУиТ. – 2024. – №1 (53). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-instrumentov-strategicheskogo-planirovaniya-na-effektivnost-funktsionirovaniya-biznes-modeley-predpriyatiy-promyshlennosti (дата обращения: 16.04.2026).

и Ю.В. Мелешко[48], С.С. Малхасьян и А.Г. Сайко[49], Д.Ф. Насиров, Р.И.У. Шодиев, М.Ф.У Олимбоев[50].

Также в ходе исследования были проанализированы труды, посвященные мировому опыту внедрения цифровых технологий в управленческие процессы, в частности, работы О.Б. Дигилиной и А.Х. Эль-Сайед[51], Е.Н. Смирнова[52], Ю. Хайлиня.[53]

Отдельного внимания заслуживают работы представителей научной школы МГИМО Университета, в частности исследования таких авторов как Е.Б. Завьялова

---

[48] Курегян С.В., Мелешко Ю.В. Механизмы взаимодействия цифрового производства, цифровых услуг и цифровых бизнес-моделей [Электронный ресурс] / С.В. Курегян, Ю.В. Мелешко // ТТПС. – 2021. – №2 (56). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizmy-vzaimodeystviya-tsifrovogo-proizvodstva-tsifrovyh-uslug-i-tsifrovyh-biznes-modeley (дата обращения: 16.04.2026).

[49] Малхасьян С. С., Сайко А. Г. Развитие бизнеса в эпоху инновационного менеджмента [Электронный ресурс] / С.С. Малхасьян, А.Г. Сайко // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – №4-4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-biznesa-v-epohu-innovatsionnogo-menedzhmenta (дата обращения: 16.04.2026).

[50] Насиров Д.Ф., Шодиев Р.И.У., Олимбоев М.Ф.У. Роль цифровых инноваций в повышении эффективности инвестиционной деятельности в условиях трансформации экономики [Электронный ресурс] / Д.Ф. Насиров, Р.И.У. Шодиев, М.Ф.У Олимбоев // Raqamli iqtisodiyot (Цифровая экономика). – 2026. – №14.I. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-tsifrovyh-innovatsiy-v-povyshenii-effektivnosti-investitsionnoy-deyatelnosti-v-usloviyah-transformatsii-ekonomiki (дата обращения: 16.04.2026).

[51]Дигилина О.Б., Эль-Сайед А.Х. Проблематика внедрения цифровых услуг в отраслях экономики стран Персидского залива / О.Б. Дигилина, А.Х. Эль-Сайед // Горизонты экономики. – 2024. – № 6 (86). С. 89-98.

[52] Смирнов Евгений Николаевич Эволюция инновационного развития и предпосылки цифровизации и цифровых трансформаций мировой экономики [Электронный ресурс] / Е.Н. Смирнов // Вопросы инновационной экономики. – 2018. – №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-innovatsionnogo-razvitiya-i-predposylki-tsifrovizatsii-i-tsifrovyh-transformatsiy-mirovoy-ekonomiki (дата обращения: 16.04.2026).

[53] Хайлин Ю. Исследование инновационного сотрудничества цифровой экономики Китая и России [Электронный ресурс] / Ю. Хайлинь // КЭ. – 2020. – №7. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-innovatsionnogo-sotrudnichestva-tsifrovoy-ekonomiki-kitaya-i-rossii (дата обращения: 16.04.2026).

и Е.И. Шумская[54], Ю.А. Ковальчук[55], В.Д. Миловидов[56], О.Б. Пичков[57], И.М. Степнов[58], И.А. Стрелец[59], А.А. Уланов[60].

**Цель исследования.** Разработать организационно-управленческий подход к оптимизации бизнес-процессов на основе применения цифровых двойников, включающий модель интеграции цифровых двойников в систему управления организацией, механизмы принятия управленческих решений и оценку роста качества и эффективности управления после указанной интеграции.

**Для достижения цели исследования поставлены следующие задачи:**

1. Систематизировать и критически проанализировать существующие теоретические подходы к управлению бизнес-процессами в контексте их оптимизации и определить основные ограничения в условиях цифровой трансформации.

2. Раскрыть сущность и управленческое содержание концепции цифрового двойника бизнес-процесса, разграничив её с инженерно-техническими

---

[54] Завьялова Е.Б. Сделки в цифровую эпоху: технология блокчейн и смарт-контракты / Е.Б.Завьялова, Е.И.Шумская // Право и управление. XXI век. — 2019. — Т. 15. №3 (52). — С. 32-38.

[55] Ковальчук Ю.А., Степнов И.М. Управление промышленными экосистемами в едином цифровом пространстве // Проблемы рыночной экономики. – 2022. – № 3. – С. 107-121.

[56] Реалии и перспективы цифровой трансформации экономики: Монография / В.Д.Миловидов, В.А.Онучак, С.Ю.Перцева [и др.]; под редакцией О.Б.Пичкова; Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации, кафедра международных экономических отношений и внешнеэкономических связей имени Н.Н.Ливенцева. М: МГИМО-Университет, 2020. — 209, [1] с.

[57] Пичков О.Б. Влияние процессов цифровой трансформации на мировую экономику / О.Б.Пичков // Международные экономические отношения: реалии, вызовы и перспективы: монография / [Л.С.Ревенко, В.В.Перская, А.В.Холопов и др.] ; под общ. ред. и с предисл. Л.С. Ревенко; Моск. гос. ин-т междунар. отношений (ун-т) МИД России, каф. междунар. экон. отношений и внешнеэкон. связей им. Н.Н.Ливенцева. — М.: МГИМО-Университет, 2019. — С. 60-68.

[58] Цифровая культура управления активами в новых бизнес-моделях: монография (серия «Управление активами») / под редакцией И.М. Степнова, Ю.А. Ковальчук; Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации, Кафедра управления активами. — Москва: ИПР РАН, 2025.— 480

[59] Стрелец И.А. Цифровизация мировой торговли: масштабы, формы, последствия / И.А.Стрелец, С.В.Чебанов. — Текст: непосредственный // Мировая экономика и международные отношения. — 2020. — Т. 64, №1. — С. 15-25

[60] Пичков О.Б. Риски и несовершенства развития цифровой экономики на современном этапе / О.Б.Пичков, А.А.Уланов // Страховое дело, №11 (296), 2017. — С. 3–8.

трактовками и определив место в понятийном аппарате менеджмента. Сравнить особенности и оценить перспективы развития российского и зарубежного рынка цифровых двойников.

3. Выявить и систематизировать факторы организационной готовности к внедрению цифровых двойников (управленческие компетенции, организационная культура, зрелость процессного управления, информационная инфраструктура и др).

4. Провести сравнительный анализ практик применения цифровых двойников в управлении бизнес-процессами в организациях различных отраслей и масштабов, выявив лучшие управленческие практики, типичные барьеры и критические факторы успеха.

5. Сформулировать практические рекомендации по организационному обеспечению внедрения цифровых двойников, включая дорожную карту внедрения, модель управления изменениями и программу развития компетенций персонала.

**Объект исследования:** Системы управления бизнес-процессами организаций различных отраслей и сфер деятельности в условиях цифровой трансформации.

**Предмет исследования:** Организационно-управленческие отношения, возникающие в процессе оптимизации бизнес-процессов на основе интеграции цифровых двойников в систему управления организации.

**Область исследования** соответствует п. 26. Паспорта специальности ВАК «Управление организацией в контексте цифровой трансформации. Стратегии и методы цифровой трансформации бизнеса».

**Теоретической базой исследования** являются работы отечественных и зарубежных ученых в области цифровизации бизнеса, а также доклады и датасеты ведущих международных организаций и компаний-лидеров цифровой трансформации. В частности, в основу гипотезы будут положены наработки новых теорий цифровизации, которые рассматривают цифровизацию как новую форму ведения бизнеса, а не просто сумму технологий.

**Методологическую основу исследования** составляют качественные и количественные методы. Они включают исторический анализ в теоретической части исследования; сценарный и сравнительный анализ в третьей главе, где представлены экономические результаты компаний до и после внедрения технологии цифрового двойника. Автор анализирует законодательные акты и стандарты, как отечественные, так и международные, как основу применения цифровых двойников в России и за рубежом, а также в качестве базы для параграфа о информационной защите цифровых двойников. Отчетности и презентации международных компаний были использованы в качестве статистических баз в третьей главе. Кроме того, автор прибегает к социологическому опросу, представленному в третьем параграфе третьей главы диссертационного исследования. Он был проведен с целью выявления основных причин потери времени студентами и причин опоздания на занятия. Полученные данные подверглись статистическому анализу. На основе предложенных автором подходов к решению данных проблем, были построены прогнозы по росту посещаемости занятий.

**Информационная и статистическая база исследования.**

Для анализа практики применения цифровых двойников в бизнес практике использовались публикации и отчеты таких компаний как Microsoft, General Electric, Hexagon, ANSYS Inc., Cal-Tek SRL, Cityzenith Inc., IBM Corporation, Saudi Aramco, ARANCA, IBM, Blue River Technology, Gartner, Accenture, КРОК, Ctrl2Go, Статконтроль. Также использовались результаты опросов и исследований ведущих мировых аналитических центров, в частности, McKinsey, Kingsresearch, ГК «Солар», Positive Technologies. Для рассмотрения практических последствий внедрения цифровых двойников в бизнес-процессы использовались отчеты Европейской комиссии и Росстата.

**Теоретическая значимость исследования.** Предложена концептуальная модель интеграции цифрового двойника в контур управления бизнес-процессами, определяющая: субъекты управления и их роли; информационные потоки между реальным процессом и его цифровым двойником; механизмы обратной связи и

принятия решений; уровни автоматизации управленческих решений (от информирования до автономного управления).

**Практическая значимость работы**. Сформированы рекомендации по организационной трансформации при внедрении цифровых двойников: изменение организационной структуры, создание новых должностей, программа развития цифровых компетенций управленческого персонала, обеспеченные комплексом решений по управлению изменениями, адаптированных к специфике внедрения цифровых двойников, в частности на базе университета.

**Научная новизна.** Разработаны научно-практические подходы к формированию целостной организационно-управленческой концепции интеграции цифровых двойников в систему управления бизнес-процессами, включая решение задачи оптимизации, и управленческому сопровождению практической реализации указанной концепции.

**Положения, обладающие научной новизной и выносимые на защиту**

1. Уточнено место цифровых терминов (например, таких как цифровая модель, цифровой двойник, цифровая тень, цифровая нить) в понятийном аппарате менеджмента в рамках исследования проблемного поля цифровизации, отличающиеся от известных исследований, приоритетностью поэтапного подхода к имплементации цифровых решений в деятельность организаций и доминированием предиктивной функции и моделирования в оптимизации бизнес-процессов. На основе теоретического анализа автору удалось выявить основные этапы имплементации цифровых решений в бизнес-процессы компаний: 1) анализ состояния и определение цели цифровизации; 2) выбор технологий; 3) анализ результатов и их оптимизация; 4) создание плана цифровой трансформации бизнес-процессов. Подробно изучив ключевые компоненты цифровой экономики, автор пришел к выводу, что наиболее востребованной бизнесом сегодня является технология цифровых двойников.

2. Проведенный анализ позволил автору сформулировать собственное определение цифрового двойника, учитывающее практическую значимость для оптимизации бизнес-процессов. *Цифровой двойник — это виртуальная модель*

*(прототип) физического объекта, динамично меняющаяся(ийся) в результате постоянного автоматического обмена данными и информацией между ними благодаря наличию связанной сквозными технологиями многослойной конструкции, предназначенная(ый) для определения и предсказания проблем объекта и моделирования вариантов их решений с целью оптимизации деятельности субъекта.* Технология цифрового двойника позволяет обеспечить управление бизнес-процессами в реальном времени на основе комбинации современных технологий, а также влиять на те факторы, которые задают параметры работы системы при минимальном участии человека.

3. Предложена концепция, реализующая целостный организационно-управленческий подход к интеграции цифровых двойников в систему управления бизнес-процессами (в отличие от существующих решений, фокусирующихся на технических аспектах), учитывающий не только установленные особенности создания цифровых двойников, отраслевые особенности бизнес-процессов, но и уровень организационной готовности организации.

4. Проведен сравнительный анализ лучших российских и зарубежных практик использования цифровых двойников для решений задач управления, позволивший идентифицировать факторы, влияющие на эффективность применения цифровых двойников: от внутренних факторов организационной готовности к внедрению цифровых двойников (управленческие компетенции, организационная культура, зрелость процессного управления, информационная инфраструктура), до последствий изменения внешней бизнес-среды, включая изменения в геополитике и влияние глобальной повестки устойчивого развития.

5. Предложен комплекс решений по оптимизации бизнес-процессов на основе интеграции цифровых двойников, отличающийся системным взглядом на трансформацию ролей, функций и компетенций менеджеров, предполагающий формирование дорожной карты внедрения изменений и апробированный на конкретной организации, позволяющий подтвердить перспективность предложенного подхода.

**Апробация результатов исследования**

*Статьи в научных журналах*

1. Синицын С.Н. Необходимость создания цифровых двойников в России / С.Н. Синицын // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2024. — Т. 1, № 3(144). — С. 77–84. — DOI 10.36871/ek.up.p.r.2024.03.01.008. (ВАК, категория К2).

2. Синицын С.Н. Цифровые двойники как инструмент формирования бизнес-среды современных организаций / С.Н. Синицын // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. — 2024. — Т. 20. — № 9(438). (ВАК, категория К1).

3. Кротова Т.Г. применение цифровых двойников для борьбы с изменением климата странами — членами БРИКС / Т.Г. Кротова, Е.Б. Завьялова, С.Н. Синицын // Вестник ВолГУ. Экономика. — 2025. — №1. — С. 167–180 (ВАК, категория К1)

*Участие в научных конференциях*

1. Участие с докладом на тему «Цифровые двойники в России» во II Международной научно-практической конференции «Цифровые международные отношения 2023», которая проходила 25–26 октября 2023 года в МГИМО МИД России.

2. Участие с докладом на тему «О необходимости создания цифровых двойников. Опыт БРИКС» в XXVI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы глобальной экономики», которая проходила 16-27 апреля 2024 года в РУДН.

3. Участие в качестве эксперта панельной сессии «Цифровизация государственного и муниципального управления: проблемы и решения» с докладом на тему «Цифровизация процессов эксплуатации образовательных учреждений. Тенденции. Проблемы. Пути решения» в рамках Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Цифровые технологии: модели управления и эконмическая эффективность» 27-28 февраля 2025 г., Санкт-Петербургский экономический университет.

4. Участие с докладом на международной научно-практической конференции «Управление инфраструктурным развитием», проходившей в МГИМО МИД России 23 сентября 2025 года

**Структура работы**

В первой главе работы «Цифровая трансформация как основа управления бизнес-процессами организации» рассмотрены теоретические подходы к ключевым понятиям цифровой экономики, определены типология и сферы применения технологии цифровых двойников.

Во второй главе «Процессы интеграции цифровых двойников в системы управления организациями в российской и зарубежной практике» содержится детальный анализ российской и зарубежной практики внедрения цифровых двойников в бизнес-процессы компаний. Особое внимание уделено вызовам, особенно необходимости обеспечить информационную безопасность.

Третья глава «Применение цифровых двойников в целях оптимизации бизнес-процессов в различных отраслях» имеет практическую направленность и предлагает конкретные меры по внедрению цифровых двойников в бизнес-процессы. В главе предлагается модель цифровизации университета, в частности, МГИМО.

# ГЛАВА 1. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

## 1.1. Цифровая трансформация как основа управления бизнес-процессами организации

Процессы цифровизации в последние годы стали определяющим фактором развития социально-экономических систем всех стран мира. Они ускоряют развитие хозяйствующих субъектов, трансформируя их бизнес-процессы, позволяя активнее приспосабливаться к происходящим изменениям, повышая эффективность функционирования и обеспечивая прочные конкурентные позиции организации на рынке.

Процессы цифровизации начались около 80 лет назад, в середине XX века, когда были созданы электронные компьютеры для научных исследований в ряде областей знаний. По мере их совершенствования и удешевления они стали широко использоваться во многих сферах деятельности, а после появления персональных компьютеров не только бизнес, но и население получило доступ к информационным технологиям.

Начался быстрый процесс оцифровки (автоматизации) аналоговых технологий и физических объектов, что позволило избавиться от огромных бумажных архивов. Оцифровка стала триггером цифровизации деятельности хозяйствующих субъектов: оцифрованные данные стали использоваться для принятия решений по всем возникающим вопросам с целью быстрого и оптимального управления организациями.

Темпы цифровизации значительно ускорились после появления в 80-90-е годы XX века интернета, а затем портативных, переносных компьютеров и весь мир заговорил о наступлении эры «цифровой экономики».

В работах зарубежных ученых Д. Тапскотта (канадский ученый, книга «Цифровая экономика»[61], 1995 г.), Х. Донга (китайский ученый, статья в соавторстве «Целостный взгляд на концепцию цифровой экосистемы», статья

[61] Tapscott D. Digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence / D. Tapscott. — New York ; San Francisco, California ; Washington, D.C. : McGraw-Hill, 1995. — 342 p.

2007 г. [62]), Н. Негропонте (американский исследователь, книга «Быть цифровым», 1995 г.[63]), Х. Кагермана (немецкий физик и бизнесмен, доклад «С Интернетом вещей на пути к 4-й промышленной революции», в соавторстве, 2011 г.[64]) были сформулированы основные положения цифровой экономики, показано влияние цифровых технологий на изменения, происходящие в обществе.

Цифровая экономика, по мнению специалистов Всемирного банка, это вся система отношений в обществе, основанная на использовании информационно-коммуникационных технологий; это этап развития экономической системы на базе сформировавшихся в ходе развертывания четвертой промышленной революции новых знаний, компетенций, инноваций, результатов интеллектуальной деятельности и, прежде всего, в виде цифровых технологий[65].

В отечественной научной литературе нет единого понимания термина «цифровая экономика». Так В.В. Иванов определяет цифровую экономику как виртуальную среду, дополняющую нашу реальность[66]; А.В. Бабкин и О.В. Чистякова подходят к рассмотрению цифровой экономики комплексно — как к типу экономики, в котором во всех сферах человеческой деятельности активно используются цифровые технологии; как к сложной организационно-технической системе, включающей законодательные, организационные, инфраструктурные, программные и другие структурные элементы, которые используются экономическими агентами для обмена знаниями в условиях постоянного

---

[62] Dong H. An Integrative View of the Concept of Digital Ecosystem / H. Dong, F. Khadeer Hussain, E. Chang [Электронный ресурс] // Third International Conference on Networking and Services, 2007. — URL: https://www.researchgate.net/publication/4314599_An_Integrative_view_of_the_concept_of_Digital_Ecosystem (дата обращения: 15.02.2025).

[63] Negroponte N. Being Digital / N. Negroponte. — Knopf Doubleday Publishing Group, 1995. — 272 p.

[64] Beyond the Internet of Things. Everything Interconnected / ed. by J.M. Batalla, G. Mastorakis, C.X. Mavromoustakis, E. Pallis. — Springer, 2017. — 408 p.

[65] Дмитриева М.А. Цифровые тренды в стратегическом управлении и существующие ИТ-риски / М.А. Дмитриева, Ю.Н. Шедько // Управленческие науки. — 2023. — Т. 13, №2. — С. 6–15.

[66] Иванов В.В. Цифровая экономика : мифы, реальность, перспектива / В.В. Иванов, Г.Г. Малинецкий. — Москва : Российская Академия наук, 2017. — 63 с.

развития[67]. При этом они солидарны с зарубежными учеными, что основу цифровой экономики составляют инновации и развитие ИТ-сферы.

П.С. Шпак, Е.Г. Сычева и Е.Е. Меринская рассматривают цифровую экономику в широком смысле как изменение характера экономических отношений; а в узком — как создание цифровых платформ и операторов, позволяющих решать различные хозяйственные задачи, в том числе стратегические[68].

В Стратегии развития информационного общества РФ на 2017-2030 гг. указано, что «цифровая экономика — это хозяйственная деятельность, в которой ключевым фактором производства являются данные в цифровом виде, обработка больших объемов и использование результатов анализа которых по сравнению с традиционными формами хозяйствования позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства, технологий, оборудования, хранения, продажи, доставки товаров и услуг»[69].

В рамках становления цифровой экономики перевод бизнес-процессов организаций на цифровую основу осуществляется поэтапно. К основным этапам относят:

1. Анализ состояния бизнес-процессов и обоснование их преобразования; постановка четких целей, которые будут достигнуты за счет цифровой трансформации этих процессов, и разработка стратегии достижения целей.

2. Выбор цифровых технологий и их интеграция в бизнес-процессы. Это требует определенного времени — для консультирования с ИТ-специалистами, создания соответствующей архитектуры предприятия, тестирования программ,

---

[67] Бабкин А.В. Цифровая экономика и ее влияние на конкурентоспособность предпринимательских структур / А.В. Бабкин, О.В. Чистякова // Российское предпринимательство. — 2017. — Т. 18. — № 24. — С. 4087–4102.

[68] Шпак П.С. Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики [Электронный ресурс] / П.С. Шпак, Е.Г. Сычева, Е.Е. Меринская // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». — 2020. — URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/kontseptsiya-tsifrovyh-dvoynikov-kak-sovremennaya-tendentsiya-tsifrovoy-ekonomiki?ysclid=luz7qczfol520920789 (дата обращения: 15.09.2025).

[69] Указ Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» // СПС Консультант Плюс.

обучения персонала новым технологиям, ознакомления клиентов с новыми сервисами и др.

3. Анализ результатов и оптимизация. После внедрения каждого нового ИТ-инструмента анализируется эффективность его действия, проводятся корректирующие мероприятия с целью повышения операционной эффективности. Основными критериями эффективности выступают время производственного цикла; производительность труда (за счет сокращения ручного труда); затраты на обслуживание бизнес-процесса; количество ошибок за счет человеческого фактора; качество продукции или услуги и процессы управления.

Формируются стратегии и операционные модели цифровой трансформации с учетом новой архитектуры, определяются приоритетные технологии, исходя из специфики деятельности организации.

4. Создание дорожной карты цифровой трансформации. Это необходимо для упорядочения деятельности сотрудников; их четкого понимания, какие процессы меняются и как, на основе каких технологий; уяснения роли каждого в процессе цифровой трансформации; понимания, что модернизация бизнеса на основе ИКТ — процесс перманентный и следует быть готовым к изменениям[70].

В ходе реализации процессов автоматизации, цифровизации экономика движется в сторону модернизации всей системы социально-экономических отношений в плане необходимости оптимизации текущих бизнес-процессов в направлении снижения затрат, упрощения взаимодействия хозяйствующих субъектов, ускорения предоставления услуг, клиентоориентированности и др., а затем начинается объективный процесс цифровой трансформации (рис 1.1.1.).

[70] Морозова Т. Цифровизация бизнеса [Электронный ресурс] / Т. Морозова. — URL: https://www.kck.ru/solutions/cifrovizaciya-biznesa (дата обращения: 05.10.2025).




Рисунок 1.1.1. Процесс развития цифровой экономики[71]

А. Прохоров и Л. Коник в книге «Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт» выделают три подхода к пониманию термина «цифровая трансформация». Суть первого подхода заключается в том, что цифровая трансформация — это процесс перманентный, на каждом новом этапе появляется совокупность информационно-коммуникационных технологий, которая значительно повышает производительность труда, что расширяет возможности

[71] Составлено автором.

бизнеса, знаменует новый этап в развитии цифровой трансформации и приводит к смене технологических укладов[72].

Приверженцы второго подхода не согласны с тем, что появление новой технологии — это уже шаг к цифровой трансформации. Они связывают ее с определенным периодом развития ИКТ и определенным набором новых технологий. Рубежом начала цифровой трансформации они считают появление так называемой «третьей платформы» (облака, мобильность, социальные технологии, «большие данные»), а все созданные ранее технологии — это лишь преддверие цифровой трансформации. То есть если первые две платформы развивали сначала серверы, а затем персональные компьютеры и вели к созданию клиентоориентированной архитектуры, то только третья платформа может привести к созданию «умной» экономики.

Адепты третьего подхода рассматривают цифровую трансформацию как трансформацию бизнеса в целом — не только в ИТ-компаниях, но и в компаниях всех отраслей экономики. Для них главное — экономические условия функционирования и те технологии, стратегии, способы организации производства, которые помогут создать в этих условиях наиболее эффективные бизнес-модели. Основная цель цифровой трансформации в третьем случае — укрепление конкурентоспособности организации, возможность постоянного развития в условиях неопределенности[73].

Компания Microsoft называет следующие отличительные признаки, характеризующие цифровую трансформацию: радикальное повышение эффективности; использование экономичных, масштабируемых и гибких

---

[72] Прохоров А. Цифровая трансформация : анализ, тренды, мировой опыт [Электронный ресурс] / А. Прохоров, Л. Коник. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : КомНьюс Груп, 2019. — 368 с. — URL: https://ацим.рф/wp-content/uploads/2021/09/digital_transformation_book.pdf (дата обращения: 15.10.2025).

[73] Прохоров А. Цифровая трансформация : анализ, тренды, мировой опыт [Электронный ресурс] / А. Прохоров, Л. Коник. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : КомНьюс Груп, 2019. — 368 с. — URL: https://ацим.рф/wp-content/uploads/2021/09/digital_transformation_book.pdf (дата обращения: 15.10.2025).

современных технологий; наличие сквозных изменений (затрагивают несколько областей бизнеса); обучение сотрудников организации[74].

Действительно, сейчас цифровая трансформация стала глобальным трендом, охватившим все сферы жизни людей. Это стало возможным благодаря развитию интернета, социальных сетей, облачных технологий. Платформенные модели ознаменовали принципиально новый подход к проектированию любых бизнес-процессов. Эти модели повышают эффективность управления путем создания комплексной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры для решения поставленных оптимизационных задач.

В основе цифровой трансформации лежит ряд принципов.

Это, прежде всего, автоматизация взаимодействия разных субъектов и автоматическое принятия решений, предоставляемых в электронном виде.

Другим принципом является использование реестровой модели при предоставлении госуслуг (все записи делаются в электронном виде, а не на бумажном носителе). Это повышает качество услуг, экономит время их предоставления, повышает надежность хранения данных, совершенствует систему госуправления.

Цифровая экономика экстерриториальна, т.е. она не знает границ и распространяется по всему миру.

Использование множества каналов коммуникации в современном бизнесе становится все более популярным и образует один из основополагающих принципов цифровой трансформации.

И еще одним принципом цифровой трансформации является способность людей самостоятельно инициировать действия и события, креативно их реализовывать и брать за них ответственность. Принципы цифровой трансформации представлены на рисунке 1.1.2.

---

[74] Там же.




Рисунок 1.1.2. Принципы цифровой трансформации[75]

Цифровая экономика диктует новые условия развития хозяйствующим субъектам, и они вынуждены пересматривать свои стратегии, чтобы соответствовать новым реалиям.

В научной литературе называют следующие стратегические направления цифровизации бизнес-процессов организации:

– сокращение количества действий для выполнения поставленных задач путем внедрения цифровых технологий и информационных систем;

– управление данными, которое дает возможность организации разрабатывать модели поведения клиентов, прогнозировать спрос, формировать предпочтения покупателей и тем самым более полно удовлетворять потребности разных групп потребителей;

– клиентоориентированность — предполагает создание бизнес-модели, ориентированной на потребности покупателя;

– стратегия внедрения инноваций — основана на постоянном мониторинге, тестировании и использовании цифровых продуктов, технологий, решений.

[75] Составлено автором.

Ученые ВШЭ дополняют эти стратегии еще двумя — цифровым партнерством и управлением ценностью.

Цифровое партнерство предполагает создание общей цифровой инфраструктуры хозяйствующего субъекта и всех стейкхолдеров, формируя так называемую «внутреннюю открытость»[76].

Управление ценностью предполагает быстрый и адекватный отклик организаций на изменения потребностей клиентов в виде совершенствования отдельных характеристик продукции, улучшения качества товаров и услуг, т.е. кастомизацию.

Стратегию цифровой трансформации стала реализовывать в 2015 г. компания General Electric на основе собственной платформы промышленного интернета (IIoT-платформа Predix). Эта стратегия используется и некоторыми отечественными предприятиями, например, авиационными. Изменив бизнес-модели, российские предприятия отрасли смогли раздвинуть рамки традиционных рыночных сегментов; использовать мультисервисные платформы и расширить комплекс сервисов[77].

Разработка и внедрение платформ промышленного интернета вещей, как правило, является результатом усилий многих организаций — отраслевых, технологических, информационных, консалтинговых, заключающих соглашения о стратегическом партнерстве и создающих консорциумы. В компаниях, принявших стратегию цифровой трансформации, вводится специальная руководящая должность ответственного за этот процесс и разрабатывается комплекс корпоративных цифровых инициатив.

---

[76] Цифровые технологии в бизнесе: практики и барьеры использования мониторинг цифровой трансформации бизнеса [Электронный ресурс] // Высшая школа экономики. — URL: https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/890550370.pdf (дата обращения: 05.10.2025).

[77] Шпак П.С. Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики [Электронный ресурс] / П.С. Шпак, Е.Г. Сычева, Е.Е. Меринская // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». — 2020. — URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/kontseptsiya-tsifrovyh-dvoynikov-kak-sovremennaya-tendentsiya-tsifrovoy-ekonomiki?ysclid=luz7qczfol520920789 (дата обращения: 15.09.2025).

По сравнению с аналоговыми (в них информация не унифицирована, хранится и передается в разных форматах[78]), цифровые технологии позволяют работать с большими данными (данными различных форматов), хранить их и обрабатывать в так называемых облаках.

На современном этапе развития цифровой экономики ее ключевыми компонентами являются, так называемые, сквозные технологии: интернет вещей, большие данные, облачные вычисления, высокоскоростной мобильный интернет 5G, квантовые технологии, робототехника, блокчейн, технологии дополненной и виртуальной реальности, искусственный интеллект.

В Национальном проекте РФ «Цифровая экономика», реализовывавшемся в России с 2019 по 2024 год[79], выделены девять современных и перспективных так называемых «сквозных» цифровых технологий: «большие данные» (big data), нейротехнологии и искусственный интеллект, системы распределенного реестра (блокчейн), квантовые технологии, новые производственные технологии, промышленный интернет, компоненты робототехники и сенсорика, технологии беспроводной связи (в частности, 5G), технологии виртуальной и дополненной реальности (VR и AR). Использование этих технологий ведет к радикальным изменениям существующих рынков и появлению новых[80].

Цифровые технологии все больше проникают в разные сферы деятельности и реализуются в онлайн-формате. Они позволяют объединить офлайн и онлайн, связывая все устройства и сервисы между собой, ускоряя процессы взаимодействия.

---

[78] Почему цифровые технологии вытесняют аналоговые [Электронный ресурс] // Тренды РБК. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/60e427ea9a79471089a0ec1d?from=copy (дата обращения: 15.02.2025).

[79] С 2025 года заменен на Национальный проект «Экономика данных и цифровая трансформация государства».

[80] Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р [Электронный ресурс]. — URL: http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf (дата обращения: 07.11.2025); Цифровая Россия — 2024. Как новые технологии изменят жизнь россиян [Электронный ресурс] // ТАСС. — URL: https://tass.ru/nacionalnye-proekty/6469993 (дата обращения: 07.11.2025).

Искусственный интеллект и большие данные помогают принимать более обоснованные решения. Открытые данные (Open Data) обеспечивают условия для свободного выгодного обмена данными между разными сферами — финансами, образованием, медициной, ЖКХ, электронной коммерцией. Блокчейн ускоряет трансграничные платежи и снижает их стоимость, устраняет посредников, повышает прозрачность и безопасность; собственные платформы организаций позволяют быстро выводить новые решения[81].

Виртуальная реальность (VR) полностью погружает человека в цифровой мир. Технология дополненной реальности (AR) добавляет цифровые объекты к реальному миру. VR и AR успешно применяются для обучения профессиям, связанным с повышенным риском либо большими затратами (пилот самолета, машинист поезда, диспетчер, водитель, горноспасатель и т.п.)[82].

Технология VR появилась еще в 70-е годы XX века (была предложена А. Сазерлендом) и в основном использовалась для игр, а уже позже — для создания инженерных приложений для промышленного проектирования. В 2010-х годах компания Google создала дешевую систему виртуальной реальности, которая и стала основой широкого распространения технологии VR. А инструмент смешанной реальности HoloLens, созданный компанией Microsoft, стал широко использоваться в бизнес-среде, в частности в медицине (для быстрого просмотра данных КТ, УЗИ и др.), в авиации при обучении сотрудников, дизайне, машиностроении, логистике и др.

Система визуализации крайне важна для принятия решений на этапе проектирования, разработки будущего продукта, мониторинга работы уже готовых продуктов. Видео повышает оперативность принятия решения, а наличие

---

[81] Почему цифровые технологии вытесняют аналоговые [Электронный ресурс] // РБК Тренды. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/60e427ea9a79471089a0ec1d?from=copy (дата обращения: 07.11.2025).

[82] Денисов С.Г. Цифровые двойники и новые человеко-машинные интерфейсы: возможности дополненной и виртуальной реальности / С.Г. Денисов // Бюллетень инновационных технологий. — 2023. — Т. 7. — № 4(28). — С. 25–29.

виртуальной и дополненной реальности помогает уменьшить количество ошибок и сэкономить время[83].

Самым существенным, что следует признать во всем происходящем — это скорость цифровой трансформации, темп совершенствования технологий и, соответственно, социально-экономических взаимодействий. В некоторых источниках говорится о качественном скачке скорости развития, изменении временно*й* сущность явлений, наступлении новой темпоральной эпохи.

Цифровая трансформация — это не просто современное явление, это перманентное состояние, это непрерывный процесс повышения степени автоматизации всех бизнес-процессов, процесс постоянного обновления цифровых стратегий, расширения горизонта планирования и прогнозирования.

В этом перманентном процессе требования клиентов постоянно повышаются. Чтобы остаться на рынке с востребованными продуктами и услугами, организация должна оперативно реагировать на происходящие изменения, быть гибкий и адаптивной, сохраняя уровень инновационности, издержек, качества, надежности и безопасности.

С учетом необходимости экономии затрат соблюдение всех названных характеристик становится практически невыполнимой задачей. И здесь на помощь опять приходят современные технологии и методы управления. С помощью компьютерного моделирования (численное моделирование или компьютерный инженерный анализ, CAE) есть возможность находить верное решение. Численные алгоритмы использовались еще в 60-70-е годы XX века для расчета конкретных физических явлений и решения задач проектирования, но применялись редко из-за нехватки специалистов[84].

Численное моделирование — это исследование физических явлений, процессов или систем объектов с помощью создания их математических моделей на основе

---

[83] Денисов С.Г. Цифровые двойники и новые человеко-машинные интерфейсы: возможности дополненной и виртуальной реальности / С.Г. Денисов // Бюллетень инновационных технологий. — 2023. — Т. 7. — № 4(28). — С. 25–29.

[84] Цифровое проектирование сегодня и завтра: модели, двойники и умные производства [Электронный ресурс]. — URL: https://engineer.yadro.com/article/digital-twins/?ysclid=luz9smhc7j613904329 (дата обращения: 15.02.2025).

численных методов и цифровых вычислений и интерпретация полученных результатов. С помощью этого метода можно определять параметры тех процессов, которые нельзя измерить в ходе полевых испытаний; оценить эффективность планируемого к приобретению оборудования и технологий; продвигать новые продукты клиентам; задавать характеристики материалов будущего и др.[85]

Интеграция ряда технологий, таких как Big Data, численное моделирование, машинное обучение и параметрическая оптимизация, технологии дополненной и смешанной реальности, предиктивная диагностика, IIoT позволяют создавать все новые инструменты для управления производством в современных условиях. Причем, возникающие цифровые инструмент — это не просто продукты взаимодействия имеющихся технологий, это инструменты, которые в свою очередь также активно участвуют в совершенствовании уже существующих технологий.

Цифровизация физических активов, их интеграция и цифровое партнерство со стейкхолдерами, задействованными в цепочке создания стоимости, новые цифровые технологии и инструменты являются главными характеристиками четвертой промышленной революции (или индустрии 4.0). Индустрия 4.0 — это закономерный, объективный процесс развития общества на протяжении многих столетий (таб. 1.1.1).

Таблица 1.1.1. Промышленные революции в мировой истории

| **Индустрия 1.0** | **Индустрия 2.0** | **Индустрия 3.0** | **Индустрия 4.0** |
|---|---|---|---|
| Механизация производства на основе воды и пара, разделение труда | Массовое производство, использование электричества | Начало автоматизации производства, внедрение ИТ-систем и электроники | Киберфизические производственные системы |

Источник: составлено автором

[85] Численное моделирование для разработки новых продуктов и технологий [Электронный ресурс]. — URL: https://habr.com/ru/companies/severstal/articles/542486/ (дата обращения: 15.02.2025).

Главным отличием четвертой революции от всех предыдущих является синтез и взаимодействие всех технологических достижений и кооперация с партнерами. Это связано с тем, что, чтобы в современных условиях сохранить свои конкурентные позиции на рынке, организации должны менять стратегию деятельности, вести бизнес по-новому, вовремя реструктуризировать бизнес-процессы, участвовать в создании инноваций, активно использовать появляющиеся передовые цифровые инструменты, одним из которых является «цифровой двойник».

## 1.2 Концептуальные основы цифрового двойника как современного технологического тренда

Как уже отмечалось, в современных условиях технологии развиваются очень быстро и, если раньше использование цифровых двойников было характерно для ведущих предприятий ряда отраслей, то сейчас эта технология используется достаточно широко. Компания McKinsey по результатам опроса руководителей высшего звена разных организаций пришла к выводу, что во многих из них уже внедрили или планируют внедрение цифровых двойников для управления бизнес-процессами. Согласно опросу, в разных отраслях экономики 86% руководителей подтвердили, что цифровые двойники применимы к их организации, около 44% заявили, что в их компаниях они уже внедрены, а 15% — планируют их внедрение[86].

Такие изменения можно объяснить следующим:

– во-первых, ростом затрат, ограниченностью практически всех видов ресурсов и нарушением цепочек поставок;

– во-вторых, возможностью данной технологии масштабировать производственные мощности для удовлетворения растущего спроса;

[86] Digital Twins: The Next Frontier of Factory Optimization [Электронный ресурс] // McKinsey Report. — URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization (дата обращения: 06.10.2025).

– в-третьих, обеспечивать операционную надежность, планировать и моделировать сценарии будущего производства и внедрения новых продуктов и услуг.

Концепция цифрового двойника (digital twin, с англ. — «цифровой близнец») появилась еще в начале 2000-х. Ее изложил американский ученый М. Гривс в своих публикациях (книга «Происхождение цифровых двойников», статья «Цифровые двойники: превосходство в производстве на основе виртуального прототипа завода»)[87], где он показал возможность взаимодействия физического объекта в реальном мире и виртуальной модели в виртуальном мире, что и легло в основу идеи цифрового двойника.

Через систему встроенных в физический объект датчиков информация о нем поступает в цифровой двойник, который отражает все изменения физического объекта и собирает информацию об этом. В результате виртуальная модель становится точной копией физического объекта, что дает возможность следить за состоянием последнего, происходящими изменениями, предвидеть его поведение, отклонения от нормы, контролировать срок службы, время проведения техобслуживание и др.

Цифровой двойник используется для создания продукта, он также осуществляет его поддержку на всех этапах жизненного цикла. Данные для цифрового двойника собираются до завершения жизненного цикла объекта и включают рабочие показатели, текущее состояние; показатели технических датчиков; историю совершенных действий[88].

Предложенный инструмент управления бизнес-процессами сначала называли «моделью зеркальных пространств», «моделью зеркалирования информации»[89], а

---

[87] Grieves M. Digital Twins, Simulation, and the Metaverse : Driving Efficiency and Effectiveness in the Physical World through Simulation in the Virtual Worlds / M. Grieves, E.Y. Hua. — Springer, 2002. — 445 p.

[88] Что такое цифровой двойник, как и зачем их использовать бизнесу [Электронный ресурс]. — URL: https://www.calltouch.rublog/chto-takoe-czifrovoj-dvojnik-kak-i-zachem-ih-ispolzovat-biznesu/?ysclid=lv54gp7225898639083 (дата обращения: 15.02.2025).

[89] Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4.

затем за виртуальными аналогами реального пространства закрепилось название «цифровой двойник».

Официально этот термин упоминается с 2010 года в материалах деятельности Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA) по созданию виртуальной копии космического корабля, отражающей всю последовательность его строительства, испытания и полетов. Массовый интерес к цифровым двойникам сформировался к 2018 году[90]. На самом деле человек всегда создавал двойников, сначала в своем воображении, потом на бумаге, затем в компьютере в цифровом формате, потом в облаке.

Практическое использование простых двойников началось в 60-е годы XX века в ходе реализации программы «Аполлон» по разработке серии космических аппаратов и их полетов на Луну вместе с астронавтами. Уже тогда создавались копии пилотируемых космических кораблей для подготовки к полетам, имитации возможных состояний корабля в космосе, моделирования условий полета и др.[91] В настоящее время в США планируется разработать полноценный цифровой двойник космического аппарата.

Другим прототипом двойников стала технология «железной птицы» (англ. — Iron Bird, название стало использоваться в США, а затем и в других странах). В ней моделирующий комплекс и система визуализации имитируют полет. Корпорация Boeing стала создавать «железных птиц» при разработке своих пассажирских самолетов в 1960-х гг. В ней представлены реальная кабина пилотов (но без системы подвижности), бортовые вычислители, реальные компоненты систем самолета, размещенные в близком соответствии с реальным их расположением на планере самолета.

---

— С. 35–43. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-istoriya-vozniknoveniya-i-perspektivy-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.11.2025).

[90] Что такое цифровой двойник, как и зачем их использовать бизнесу [Электронный ресурс]. — URL: https://www.calltouch.rublog/chto-takoe-czifrovoj-dvojnik-kak-i-zachem-ih-ispolzovat-biznesu/?ysclid=lv54gp7225898639083 (дата обращения: 15.02.2025).

[91] Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4. — С. 35–43. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-istoriya-vozniknoveniya-i-perspektivy-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.11.2025).

Создание «железных птиц» становится сейчас все более актуальным, поскольку все пассажирские самолеты новых поколений оснащаются электродистанционными системами управления (ЭДСУ). Они упрощают конструкцию самолета, но усложняют управление, поэтому отработка взаимодействия всех систем проводится на «железной птице». Такая отработка позволяет сократить время разработки нового самолета, при этом и сама конструкция «птицы» постоянно совершенствуется[92].

Эта технология используется и в России в авиации в виде полноразмерного стенда системы управления с 1958 года, а также в некоторых других странах (Индия, Франция, Китай).

В нашей стране в инженерном центре РСК «МиГ» в эксплуатации находятся три стенда, воспроизводящие системы разных моделей самолетов МиГ. Стенд создается с опережением на несколько лет. После определения компоновки самолета, создается модель, которая проходит испытания. Полученные характеристики обрабатываются, собирается банк данных, а окончательные показатели выявляются на стадии летных испытаний. На основании всех результатов создается «железная птица» и сам самолет[93].

Изучив историю развития цифрового двойника, Д.А. Сосфенов предложил выделить три этапа:

1. Появление концепции цифрового двойника (1991–2010 гг.).
2. Разработка и применение технологии на ключевых направлениях промышленного производства (2010–2014 гг.).
3. Широкое распространение цифровых двойников в традиционных и новых отраслях экономики (2014 г. – настоящее время)[94].

---

[92] Испытания «Железной птицы» [Электронный ресурс]. — URL: https://www.aviationunion.ru/media/news/10081/?ysclid=lvgrvrgsr7944157731 (дата обращения: 15.10.2025).

[93] Самолет наизнанку : как МиГ воспроизводит поведение самолетов на земле [Электронный ресурс]. — URL: https://lenta.ru; https://lenta.ru/articles/2017/06/07/iron_bird (дата обращения: 15.02.2025).

[94] Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4.

За это время цифровой двойник эволюционировал, пройдя несколько этапов развития технологии:

1 этап — создание физических объектов без цифрового прототипа,

2 этап — использование цифровой модели только на стадии создания искусственных объектов.

3 этап — взаимодействие (обмен информацией) между физическим и цифровым двойниками.

4 этап — обмен информацией и обновление цифрового и физического двойников в реальном времени в ходе их взаимодействия[95].

Действительно, идея цифрового двойника прошла определенный период становления, накопления знаний и практического опыта в ходе многолетней работы по проектированию, инженерной подготовке производства на основе CAD/CAM/CAE-систем (CAD — система автоматизированного проектирования; CAM — система автоматизированного производства; CAE — комплекс разнообразных программных продуктов, позволяющих при помощи расчетных методов оценить, как поведет себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации), использования метода конечных элементов (FEA, позволяет рассчитать эксплуатационную нагрузку), FMEA-модели (анализ видов и последствий отказов), а впоследствии — создания облачных технологий и внедрения IoT, технологий больших данных и искусственного интеллекта. Компоненты, необходимые для создания цифрового двойника, представлены в таблице.

— С. 35–43. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-istoriya-vozniknoveniya-i-perspektivy-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.11.2025).

[95] Прохоров А. Цифровой двойник : анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. — 1-е изд., испр. и доп. — Москва : АльянсПринт, 2020. — 401 с.

Таблица 1.1.2. Компоненты для создания цифрового двойника и их содержание[96]

| | Компоненты | Содержание |
|---|---|---|
| Цифровой двойник | Средства комплексного моделирования и симулирования | максимальное число составных элементов объекта |
| | | операционные данные в реальном режиме времени с датчиков и сенсоров |
| | Средства коммуникации и объединение операционных данных и превращение их в информацию | Internet of Things (IoT) |
| | Средства предсказательной аналитики | методы статистики, интеллектуального анализа данных, теории игр, машинного обучения |

Как пишут А. Прохоров и М. Лысачев, цифровой двойник развивался под воздействием двух процессов — конвергенции (появления и встраивание в него все новых технологий) и дивергенции (применения технологии к разным объектам, частям объектов, активам в разных отраслях, для разных групп пользователей и т.д.)[97], т.е., по сути, он постоянно развивался и вширь, и вглубь.

Технология цифрового двойника — это «многослойный пирог», который включает: физический слой; цифровой слой; программный слой (программное обеспечение), объединяющий первые два; киберслой (алгоритмы машинного обучения, больших данных и искусственного интеллекта).

Не случайно, технологию цифрового двойника называют технологией-интегратором многих сквозных цифровых технологий и субтехнологий,

[96] Составлено автором.

[97] Прохоров А. Цифровой двойник: анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. — 1-е изд., испр. и доп. — Москва : АльянсПринт, 2020. — 401 с.

технологией-драйвером, которая инициирует технологические прорывы и обеспечивает условия устойчивого развития[98].

Что касается интерпретации термина «цифровой двойник», то в зарубежной литературе можно найти множество его определений. Цифровой двойник — это объединенная модель реальной машины, работающей в облаке и моделирующей ее состояние здоровья (Ли Дж. Б., Као Х.А.[99]); интегрированное мультифизическое, многомасштабное, вероятностное моделирование объекта или системы, которое использует лучшие доступные физические модели, обновления датчиков, историю и т. д. (Глэссген Е., Штрагель Д.[100]); цифровая копия живой или неживой физической сущности, которые существуют одновременно (Эль Саддик А.[101]); использование цифровой копии физической системы для оптимизации в реальном времени (Зодерберг Р. и др.[102]); реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле продукта с использованием физических, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними (Тао Ф. и др.[103]); динамическое виртуальное представление физического объекта или системы в течение всего жизненного цикла с использованием данных в режиме реального времени для понимания, изучения и рассуждения (Болтон Р. Н. и др.[104]); сложная модель, описывающая

---

[98] Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4. — С. 35–43. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-istoriya-vozniknoveniya-i-perspektivy-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.11.2025).

[99] Lee J. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems / J. Lee, B. Bagheri, H.A. Kao // Manufacturing Letters. — 2015. — 3. — P. 18–23.

[100] Glaessgen E. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles [Электронный ресурс] / E. Glaessgen, D. Stargel // Paper for the 53rd Structural Dynamics and Materials Conference: Special Section on the Digital Twins. — 2012. — URL: http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2012-1818 (дата обращения: 02.10.2025).

[101] El Saddik A. Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies / A. El Saddik // IEEE Multi Media. — 2018. — Vol. 25, no. 2. — P. 87–92.

[102] Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production / R. Söderberg et al. // CIRP Annals. — 2017. — Vol. 66, Iss. 1. — P. 137–140.

[103] Digital Twin Service towards Smart Manufacturing Procedia / Q. Qi et al. // CIRP. — 2018. — Vol. 72. — P. 237–242.

[104] Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms [Электронный ресурс] / N. Ruth et al. // Journal of service management. — 2018. — Vol. 29 Issue 5. — P. 776–808. — URL: https://www.researchgate.net/publication/341251035_Customer_experience_challenges_bringing_together_digital_physical_and_social_realms (дата обращения: 15.02.2024).

структуру, контекст и поведение, как единичных промышленных объектов, так и составленных из них систем (Шмидт М.-Т. др.[105]); «процесс численного моделирования для создания виртуальных прототипов» (Хиндсбо М.[106], Потгитер М.[107])

До 2015 г. эта технология упоминалась только в связи с промышленными изделиями. Затем понятие стало расширяться и характеризоваться как цифровая копия живой или неживой физической сущности, как цифровой прототип активов, процессов и/или систем в естественной или искусственной среде. [108]

В большинстве определений цифровой двойник характеризуется как модель, копия физического объекта. Есть определения, где термин трактуется и как процесс моделирования объектов. Практически во всех определениях говорится о взаимодействии физических и виртуальных объектов, о численном моделировании, передаче данных, значимости использования двойника для принятия решения об оптимизации процессов.

Д.А. Сосфенов в своем исследовании приводит недавно сформулированное определение цифрового двойника, предложенное в зарубежной литературе, а именно, это «...цифровое представление активного уникального продукта <...> или уникальной системы продуктов и услуг <...>, которое включает в себя его выбранные характеристики, свойства, условия и поведение с помощью моделей, информации, а также данных в рамках одного или даже нескольких этапов жизненного цикла» (Старк Р., Дамеру Т.)[109].

---

[105] Digital Twins for Continuous mRNA Production / H. Helgers et al. // Processes. — 2021. — 9(11). — P. 19–67.

[106] Hindsbo M. Modeling in the era of digital transformation / M. Hindsbo // Scientific and technical journal from the company. — 2018. — No. 5. — P. 1–4.

[107] Potgieter M.C. Modeling and optimization of complex systems and processes / M.C. Potgieter // Scientific and technical journal from the company. — 2018. — No. 5. — P. 21–24.

[108] Шпак П.С. Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики [Электронный ресурс] / П.С. Шпак, Е.Г. Сычева, Е.Е. Меринская // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». — 2020. — URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/kontseptsiya-tsifrovyh-dvoynikov-kak-sovremennaya-tendentsiya-tsifrovoy-ekonomiki?ysclid=luz7qczfol520920789 (дата обращения: 15.09.2025).

[109] Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4. — С. 35–43. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-istoriya-vozniknoveniya-i-perspektivy-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.11.2025).

Зарубежные авторы в основном придерживаются официального определения цифрового двойника как точной виртуальной модели реального физического продукта, подчеркивают взаимодействие реального и виртуального пространства. При этом исследователь Т. Кун замечает, что среди ученых нет единства мнения по поводу понимания реального пространства. Для одних это продукция, для других — активы, для третьих — целые системы (физические продукты и нефизические «вещи, например, услуги[110].

Райт Л. и Дэвидсон С. в своей статье «Как определить разницу между моделью и цифровым двойником» приводят определение, обычно используемое Университетом оборонных закупок в оборонной, аэрокосмической и смежных отраслях. Цифровой двойник — это «интегрированное мультифизическое, многомасштабное вероятностное моделирование встроенной системы, поддерживаемое Digital Thread (цифровой поток, цифровая цепочка, цифровая нить), которое использует наилучшие доступные модели, информацию датчиков и входные данные для отражения и прогнозирования действий / производительности в течение срока службы соответствующего физического двойника»[111].

Есть еще один подход к пониманию данного явления: цифровой двойник — это «не технология, а слияние многих новейших цифровых технологий, которые помогают достигать бизнес-результатов и приносить пользу различным отраслям» (Дж. Малим)[112].

В отечественной литературе также встречаются разные подходы к пониманию цифрового двойника.

В обществе до сих пор существуют определенные заблуждения по поводу понимания цифрового двойника. В частности, есть мнение, что цифровой двойник — это просто 3D-модель для визуализации производственного актива (станка, здания). Есть и другое мнение, что цифровой двойник — это такая волшебная

---

[110] Там же.

[111] Wright L. How to tell the difference between a model and a digital twin / L. Wright, S. Davidson // Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci. — 2020. — 7, 13.

[112] Прохоров А. Цифровой двойник : анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. — 1-е изд., испр. и доп. — Москва : АльянсПринт, 2020. — 401 с.

коробка113, в которую помещается неэффективный объект (предприятие) и без особых усилий вскоре становится эффективным. На самом деле все не так просто.

А. Никитин считает, что **ц**ифровой двойник предприятия — это его копия в виртуальной среде, которая точно воспроизводит процессы и операции на предприятии и позволяет решать широкий спектр бизнес-задач[114].

А. Прохоров и Л. Коник определяют цифровой двойник как «виртуальную модель, которая на микро- и макроуровне описывает реально существующий объект (выступая как двойник-экземпляр готового конкретного изделия) или как цифровой двойник-прототип будущего объекта»[115].

А.В. Комраков, А.И. Сухоруков называют цифровым двойником гибридную модель, которая возникает как результат взаимодействия реального и виртуального пространства для сокращения затрат, предотвращения отключений и сбоев в работе предприятия и достижения других целей[116.]

Цифровой двойник — это сложный программный продукт, который появляется в результате анализа разнообразных данных, собираемых в течение жизненного цикла реального объекта; как набор цифровых технологий, которые используют достижения точных наук, теории управления, оптимизации для моделирования и реинжиниринга бизнес-процессов объектов и систем[117].

Самое общее определение цифрового двойника описывает его как виртуальную модель любых объектов, систем, процессов или людей, которая точно

---

[113] Цифровой двойник – что это такое? [Электронный ресурс]. — URL: https://habr.com (дата обращения: 07.11.2025).

[114] Там же.

[115] Прохоров А. Цифровая трансформация : анализ, тренды, мировой опыт [Электронный ресурс] / А. Прохоров, Л. Коник. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : КомНьюс Груп, 2019. — 368 с. — URL: https://ацим.рф/wp-content/uploads/2021/09/digital_transformation_book.pdf (дата обращения: 15.10.2025).

[116] Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства [Электронный ресурс] / Н.В. Курганова и др. // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Vol. 7, no. 5. — P. 105–115. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyh-dvoynikov-kak-odno-iz-klyuchevyh-napravleniy-tsifrovizatsii-proizvodstva?ysclid=luvfkxlsmt157138445 (дата обращения: 06.11.2025).

[117] Как цифровые двойники помогают российской промышленности [Электронный ресурс]. — URL: https://rb.ru/longread/digital-twin/ (дата обращения: 15.02.2025).

воспроизводит форму и действия оригинала и синхронизирована с ним[118], целью которой является детальный анализ, оптимизация и управление производственными операциями.

Г.Б. Коровин с точки зрения функционального подхода определяет цифровой двойник, как «обучаемую систему, состоящую из комплекса математических моделей разного уровня сложности, уточняемую по результатам натурных экспериментов, позволяющую получить первый натурный образец изделия, соответствующий требованиям технического задания, а также предсказывающую его поведение на всем жизненном цикле»[119].

Одной из современных особенностей цифрового двойника является использование виртуальной модели в течение всего жизненного цикла физического двойника. Если раньше после создания нового продукта она больше не использовалась, то сейчас цифровой двойник используется, активно обновляясь с течением времени при изменении физического объекта, системы, процесса и др.

С учетом этого можно сделать вывод, что цифровой двойник — это динамическая, а не статическая модель реального объекта: датчики физического объекта, пользователи постоянно передают информацию цифровому двойнику, а он в свою очередь передает оценки и прогнозы состояния объекта, которые используются для улучшения его работы[120].

По своей сути, цифровой двойник — это современный технологический тренд, новая философия развития как результата развертывания четвертой промышленной революции.

---

[118] Технологии визуализации как процесс создания цифрового двойника организации в области управления рисками [Электронный ресурс]. — URL: ГОСТhttps://elar.urfu.ru/handle/10995/119934?ysclid=lvch6belp6287347079 (дата обращения: 15.02.2025).

[119] Коровин Г.Б. Возможности применения цифровых двойников в промышленности / Г.Б. Коровин // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2021. — 27(8). — С. 124–133.

[120] Цифровой двойник: экспериментируя с будущим [Электронный ресурс]. — URL: https://rostec.ru/media/news/tsifrovoy-dvoynik-eksperimentiruya-s-budushchim/ (дата обращения: 07.11.2025).

С 1 января 2022 года в России начал действовать национальный стандарт цифровых двойников изделий — ГОСТ Р 57700.37–2021, в котором дается официальное определение терминов «цифровой двойник изделия», «цифровая модель», «математическая модель».

Согласно ГОСТу, цифровой двойник изделия — это система, состоящая из цифровой модели и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. Под цифровой моделью понимается система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявленным к изделию требованиям. Математическая модель представляет собой модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений[121]. Она позволяет выстроить математическую зависимость между отдельными составляющими виртуальной модели объекта.

В целом определения цифрового двойника варьируются от самого широкого подхода — определения цифрового двойника как цифровой копии живого или неживого объекта до самого узкого, т.е. понимания его как технического и технологического решения (мультифизическая модель, статистическая модель, передача данных между физическим и цифровым двойниками в реальном времени и т. п.), необходимого для выполнения двойником соответствующих функций[122].

Разнообразие подходов к пониманию цифровых двойников объясняется тем, что технологии, заложенные в цифровой двойник, не остаются неизменными; компании используют разные по сложности и набору технологий цифровые

---

[121] ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения [Электронный ресурс]. — URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/75810/ (дата обращения: 15.02.2025).

[122] Прохоров А. Цифровой двойник : анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. — 1-е изд., испр. и доп. — Москва : АльянсПринт, 2020. — 401 с.

двойники; объекты, к которым они применяются, отличаются по сложности, по требуемому функционалу, по происхождению (искусственные, созданные природой, живые), применяться в разных отраслях и др.

Кроме термина «цифровой двойник», в литературе используются такие категории как «цифровая модель», «цифровая нить», «цифровая тень», «цифровой клон».

Цифровой двойник связан с объектом, который действительно существует, цифровой двойник без физического двойника — это модель (например, запланированный к строительству прототип здания со всеми коммуникациями).

«Цифровая нить» — это технология, которая находит причинно-следственные связи в большом массиве данных и соответственно увязывает те решения, которые на их основе принимались, независимо от периода, этапа создания продукта. Это крайне важно, т.к. отсутствие понимания обоснованности принятия того или иного решения может повлиять на состояние бизнеса. Цифровая нить помогает избежать таких проблем. Она связывает все элементы модели цифрового двойника в течение жизненного цикла, упрощает их взаимодействие, обеспечивает обновление[123].

Цифровая тень — по своей сути более сложное понятие, поскольку предполагает, что объект из реального мира уже передает информацию в цифровой слой (например, транспортное приложение: человек ждет автобус на остановке и видит на карте, где именно он сейчас находится)[124].

Цифровая тень показывает поведение физического объекта, работающего в нормальных условиях. Она может спрогнозировать поведение реального объекта в рамках собранного объема данных, но не может моделировать ситуации, в которых реальный объект не использовался. То есть цифровая тень показывает параметры

---

[123] Там же.

[124] От моделей до предсказаний: что могут цифровые двойники и кто их создает [Электронный ресурс]. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/637b31bc9a794783c9258e82 (дата обращения: 16.04.2025).

состояния физического объекта в реальном времени, при этом она лишь моментальная фотография физического объекта, т.е. «пассивна»[125].

Если физический и цифровой слои активно обмениваются информацией с помощью программного слоя и влияют друг на друга, то это уже полноценный цифровой двойник (например, программа-навигатор, которая собирает информацию с огромного количества машин и выдает карту пробок, помогая водителю принимать соответствующие решения).

В настоящее время осуществляется разработка так называемого предсказательного подхода — создание прогнозных цифровых двойников, наделенных новыми свойствами (навигатор на основании огромного массива данных с высокой точностью предсказывает, где пробка возникнет через 15 минут и покажет водителю альтернативный маршрут)[126].

Цифровое клонирование — это технология, которая включает алгоритмы глубокого обучения, позволяющие манипулировать имеющимися гиперреалистичными фотографиями, аудио и видео материалами. Оно стало популярным в индустрии развлечений и, прежде всего, у кинокомпаний, создающих виртуальных актеров взамен умерших для продолжения съемок фильма. Технология используется также для создания аватаров исторических личностей в образовательной деятельности.

Отличие «цифрового двойника» от «цифрового клона» заключается в том, что в последнем случае цифровая модель отражает только тот или иной этап жизненного цикла объекта, но не все его этапы[127].

---

[125] В чем разница между цифровой моделью, цифровой тенью и цифровым двойником? [Электронный ресурс]. — URL: https://www.3dfindit.com/ru/engiclopedia/digitaltwins (дата обращения: 18.05.2025).

[126] От моделей до предсказаний: что могут цифровые двойники и кто их создает [Электронный ресурс]. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/637b31bc9a794783c9258e82 (дата обращения: 15.02.2025).

[127] Оценка влияния внедрения цифрового двойника на эффективность бизнес-процессов промышленного предприятия [Электронный ресурс]. — URL: http://elar.urfu.ru; http://elar.urfu.ru/handle/10995/109399 (дата обращения: 07.11.2025).

Обобщая анализ имеющихся в литературе определений, можно предложить развернутое определение цифрового двойника, в котором учитываются технический и организационный подходы к его пониманию, цель и значение. Цифровой двойник — это виртуальная модель (прототип) физического объекта, динамично меняющаяся(ийся) в результате постоянного автоматического обмена данными и информацией между ними благодаря наличию связанной сквозными технологиями многослойной конструкции, предназначенная (ый) для определения и предсказания проблем объекта и моделирования вариантов их решений с целью оптимизации деятельности субъекта.

Двойники могут быть очень маленькими, отображая компонент в сложной системе, или очень большими, представляя собой совокупность многих частей или даже многих систем[128]. Между работой цифрового двойника и его физического прототипа допускается погрешность в 5%.

Создание цифрового двойника начинается с формирования идеи и разработки концепции, которая предполагает осознание области применения, функционала, значения цифрового двойника; набора тех данных, которые необходимы для его появления. Если есть физический объект, то непосредственно осуществляется и сбор данных.

Затем разработчики сводят полученные данные из всех источников для составления карты прототипа, анализа его характеристик, воспроизводства процессов в разных режимах и моделируют объект (цифровой клон) с помощью специализированного программного обеспечения. После этого он транспортируется на платформу, в которую интегрированы математические модели, данные и интерфейс для управления цифровым двойником, превращая его в динамическую систему. Двойник активируется, специалисты устраняют появляющиеся сбои, доводя его до совершенства[129], а затем создают оригинальный

---

[128] Как цифровые двойники помогают российской промышленности [Электронный ресурс]. — URL: https://rb.ru/longread/digital-twin/ (дата обращения: 07.11.2025).

[129] Виды цифровых двойников. Что такое цифровой двойник, как и зачем их использовать бизнесу [Электронный ресурс]. — URL: https://www.calltouch.rublog/chto-takoe-czifrovoj-dvojnik-kak-i-zachem-ih-ispolzovat-biznesu/?ysclid=lv54gp7225898639083 (дата обращения: 14.03.2025).

объект или управляют объектом, получая данные от физического актива в режиме реального времени, прогнозируя результаты, помогая принимать оптимальные решения.




Рисунок 1.2.2. Этапы создания и работы цифрового двойника[130]

По мере получения большего количества данных цифровой двойник развивается. Если физический актив выводится из эксплуатации, цифровой двойник может быть использован для информирования о проектировании и эксплуатации будущих активов[131].

Сроки создания цифрового двойника зависят от заданных параметров, задач проекта, степени зрелости предприятия, его ИТ-инфраструктуры, участия клиента в проекте. В среднем на создание двойника для небольшого актива с небольшой степенью цифровизации требуется 3–4 месяца, для актива средней степени цифровизации — примерно полгода, для крупных проектов, предприятий с низким уровнем цифровизации — до года[132].

Говоря о работе цифрового двойника, следует отметить, что он работает в режимах «видеть», «думать» и «делать».

В режиме «видеть» он собирает данные объекта в конкретной ситуации и данные из внешней среды.

---

[130] Составлено автором.

[131] Подробное руководство по технологии цифровых двойников [Электронный ресурс]. — URL: https://www.testingxperts.com/blog/digital-twin/ca-en#Evolution%20of%20Digital%20Twin%20Technology (дата обращения: 14.03.2025).

[132] Цифровой двойник — что это такое? Объемная картинка или работающий актив? [Электронный ресурс]. — URL: https://habr.com/ru/articles/718060/(дата обращения: 14.03.2025).

В режиме «думать» цифровой двойник сравнивает полученные данные с техническими параметрами и условиями эксплуатации и принимает решение (или предлагает несколько вариантов решения).

В режиме «делать» он реализует выбранный вариант, контролируя работу отдельных систем и объекта в целом.

Компьютерная визуализация, встроенная в технологию цифрового двойника, позволяет выявить отклонения, а искусственный интеллект принимает решение об их самостоятельном устранении или вмешательстве человека[133].

Итак, основными преимуществами технологии цифрового двойника можно назвать:

– использование предыдущего опыта при разработке новых активов (т.е. наследование данных);

– интеграция деятельности удаленных коллективов или работников в работе над проектом;

– экономия времени для принятия решений;

– экономия затрат на проведение физических испытаний, внеплановых гарантийных ремонтов и др.;

– клиентоориентированность — установление тесной связи с заказчиком (потребителем) для повышения точности оценки состояния объекта и степени его готовности к использованию;

– сокращение времени разработки новых продуктов вследствие возможности проведения испытаний и необходимых изменений в виртуальной среде до начала производства[134];

---

[133] Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства [Электронный ресурс] / Н.В. Курганова и др. // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Vol. 7, no. 5. — P. 105–115. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyh-dvoynikov-kak-odno-iz-klyuchevyh-napravleniy-tsifrovizatsii-proizvodstva?ysclid=luvfkxlsmt157138445 (дата обращения: 06.11.2025).

[134] Цифровые двойники в промышленности: что это, как их развивают в России и какие предприятия используют [Электронный ресурс]. — URL: https://indpages.ru/solutions/czifrovye-dvojniki-v-promyshlennosti/?ysclid=luvheo8s8a613987316 (дата обращения: 15.08.2025).

– возможность отслеживания ситуации не только «на данный момент», но и на будущее[135].

Технология цифрового двойника представляет особый интерес, поскольку стыкует цифровую и физическую реальности и при этом развивается на фоне конвергенции целого ряда новых перспективных технологий (аддитивные технологии, искусственный интеллект, интернет вещей и т.д.)[136].

В целом, подводя промежуточный итог, отметим, что в концепцию цифрового двойника заложена идея обеспечить управление многими бизнес-процессами предприятия в реальном времени на основе комбинации современных технологий, а также дать возможность влиять на те факторы, которые задают параметры работы объекта или системы при минимальном участии человека и с наибольшей эффективностью. Для обоснования целесообразности применения цифровых двойников для оптимизации бизнес-процессов далее будут рассмотрены основные теории науки менеджмента, в той их части, которая поможет оценить эффективность применения рассматриваемой технологии в контексте управления.

Внедрение цифрового двойника на производстве, при строительстве или управлении действующим объектом инфраструктуры — это не просто установка программного обеспечения, а глубокое изменение парадигмы управления. Цифровой двойник становится инструментом менеджмента, что требует пересмотра классических управленческих подходов.

Цифровые двойники являются новой вехой в менеджменте, однако, можно предложить синтез теорий менеджмента, которые, на авторский взгляд, наиболее релевантны для эффективного управления объектом с помощью цифрового двойника.

*Теория жизненного цикла и управления актив*ами (Asset Lifecycle Management, ALCM) — концепция стратегического подхода к управлению физическими или цифровыми активами на протяжении всего их полезного жизненного цикла.

---

[135] Цифровой двойник — что это такое? Объемная картинка или работающий актив? [Электронный ресурс]. — URL:https://habr.com/ru/articles/718060/ (дата обращения: 15.08.2025).

[136] Прохоров А. Цифровой двойник : анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. — 1-е изд., испр. и доп. — Москва : АльянсПринт, 2020. — 401 с.

Концепция жизненного цикла была предложена в статье «Управление жизненным циклом активов: для повышения эффективности физических активов в промышленности»[137] (2005) Чарльзом А. Шуманом и Аланом К. Брентом. Авторы предложили модель ALCM для активов в промышленной отрасли, которая. интегрирует концепции общего управления проектами и системной инженерии с операционной надёжностью. Целью модели ALCM является максимизация ценности активов для организации посредствам сокращения до минимума затрат и рисков, связанных с их владением. Концепция описывает сокращение затрат на всех этапах жизненного цикла объекта, от планирования приобретения и выбора поставщиков до обслуживания, вывода из эксплуатации и утилизации (см. рисунок 1.2.3.).




Рисунок 1.2.3. Этапы жизненного цикла актива

*Источник: получен автором из интерпретации модели ALCM [Электронный ресурс]. – URL: https://dinord.ru/di-news/chto-takoe-upravlenie-zhiznennym-ciklom-produkta-plm/ (дата обращения: 19.04.2026).*

[137] Schuman C.A. Brent A. Asset life cycle management: towards improving physical asset performance in the process industry// June 2005International Journal of Operations & Production Management - 25(6):566-579
DOI:10.1108/01443570510599728

Применение данной концепции к строительству с применением ЦД проиллюстрировано в параграфе 3.3, BIM- технологии в жизненном цикле объекта.

Оптимизация затрат реализуется через реализацию программ профилактического обслуживания, оптимизации использования активов и принятии решений их замене. Эти мероприятия помогают минимизировать затраты на жизненный цикл и максимизировать возврат инвестиций.

В преломлении к теме данного исследования теория работает следующим образом. Цифровой двойник соответствует набору определенных норм и требований. Он обеспечивает их соблюдение на протяжении жизненного цикла активов. Цифровой двойник по своей сути является инструментом управления полным жизненным циклом продукта или актива — от концепции до утилизации. В рамках этой теории цифровой двойник позволяет реализовать замкнутый цикл управления, где данные от реального физического объекта на этапе эксплуатации передаются в виртуальную модель и используются для улучшения проектирования будущих поколений продукта или корректировки условий эксплуатации текущих. Управление идет не по факту поломки, а на основе прогнозирования состояния (переход к предиктивной аналитике).

*Теория ограничений (Theory of Constraints, TOC)* Элияху Голдратта (Eliyahu M. Goldratt).[138] Эта популярная концепция менеджмента была разработана в 1980-х годах. Согласно этой теории, в любой системе всегда есть хотя бы одно «узкое» место, то есть процесс или ресурс, который ограничивает всю цепочку создания ценности. Эти ограничения сдерживают общую эффективность системы, и их необходимо обнаружить и устранить для значительных улучшений работы в совокупности. Если ограничения основного «узкого» места не учитывать, то любые попытки нарастить производительность других участков не приведут к значимому росту общей производительности. Выявив такой элемент системы, следует вывести его производительность на максимум, затем расширить его возможности. После этого процесс начинается заново, с поиска нового «узкого» места.

---

[138] Элияху М. Голдратт, Джефф Кокс / Цель. Процесс непрерывного совершенствования — Минск: Попурри, 2009. — 496 с.

Таким образом, фокус смещается с оптимизации всей системы на ее главное «узкое» место. Выявив узкие места в системе и грамотно ими управляя, возможно достигнуть значительного роста производительности без масштабных инвестиций.

В основе методологии ТОС лежат: концепция «критического звена цепи», «деревья» текущей и будущей реальностей для диагностики существующих проблем и пять шагов устранения узких мест.

Пять шагов ТОС включают в себя:

1. Выявление ограничения в системе.

2. Вывод на максимум его производительности.

3. Подстраивание производительности остальных узлов системы под ограничения данного участка.

4. Расширение пропускной/производственной возможности данного участка системы.

5. Возврат к первому этапу и выявление нового «узкого» места. Затем повторяется весь цикл. (рис. 1.2.4.)




Рисунок 1.2.4. Пять шагов ТОС

*Источник: Составлено автором*

В ТОС применяются несколько основных методов. Первый - метод управления производством «Барабан-Буфер-Канат» (DBR). Барабан – это «узкое» место системы, задающее ритм работы всей совокупности элементов. Буфер – производственный запас перед «узким» местом. Канат – механизм управления всей системой, синхронизирующий в ней все процессы под «ритм барабана».

Второй метод – «Критической цели» предполагает управление не на основе традиционных диаграмм Ганта (графики, демонстрирующие реализацию задач проекта по двум осям: вертикальная – список задач, горизонтальная – время выполнения задач), а через критическую цепь, под которой понимается последовательность задач, ограниченную ресурсами. При этом основное внимание уделяется совершенствованию ключевых этапов процесса. В качестве примера можно привести строительство объекта. Подрядчики закладывают избыточные резервы времени на возможности задержек при реализации каждого этапа работы, при этом сроки реализации проекта искусственно затягиваются.

Применим теорию к цифровым двойникам. Цифровой двойник сооружения позволяет выявить критическую цепь, представляющую собой последовательность работ, определяющую сроки строительства. Лишние временные буферы убираются. Остается общий резерв времени. Также, с помощью технологии ЦД, выстраивается четкая последовательность выполнения задач в порядке приоритетности, без параллельного растягивания сроков и с четким пониманием необходимого количества строительных материалов и бригад на объекте. В результате, объект будет реализован быстрее, так как убраны простои между этапами реализации работы.

Третий метод - логические «деревья» Голдратта представляют собой инструмент анализа проблем. Суть метода сводится к выявлению корневых проблем, построению логических «деревьев», поиску вариантов решения проблем и оценку последствий. Различают три основных вида «деревьев». «Дерево текущей реальности» (CRT) демонстрирует проблемы в текущей системе. Цифровой двойник позволяет проанализировать работу реально существующей системы. «Дерево будущей реальности» (FRT) позволяет увидеть, какие изменения приведут к улучшению системы. «Дерево предпосылок» (PRT) используется для выявления условий, которые должны быть выполнены для успешной модернизации системы. Цифровой двойник позволяет произвести сценарный анализ с различными возможными изменениями в системе и выявить те изменения в системе, которые позволят максимизировать ее производительность.

В третьей главе диссертационного исследования (параграф 3.2) представлен полный цикл ТОС для месторождения нефти имени Александра Жагрина «Газпром нефть», реализованный с помощью цифрового двойника.

Было выявлено «узкое» место, а именно система сбора. Пропускная способность которого в сутки составляет 1500 тонн нефти. Это его максимальная мощность. Рост добычи скважин, находящихся в производственной цепи перед системой сбора, выше максимальных 1800 тонн/сутки, а также увеличение производительности других узлов (систем подготовки и транспортировки нефти, стоящих после системы сбора в производственной цепи) не приведут к увеличению общей производительности до тех пор, пока не будет расширен потенциал системы сбора. Поэтому работа всех узлов подстраивается под ограничения системы сбора нефти. С помощью цифровой копии месторождения производится сценарный анализ роста пропускной способности данного узла при различных вариантах расширения возможностей этого участка (например, увеличение количества труб и коллекторов). После чего выбирается оптимальный вариант и реализуется на реальном месторождении. Далее анализ начинается сначала и выявляется новое «узкое» место. Скорее всего это будет энергетика, потенциал которой ограничен 1750 тоннами в сутки.

Цифровой двойник создает уникальную возможность для динамического выявления «узких мест». В классической ТОС это требует трудоемкого сбора данных. Цифровой двойник находит места в системе, которые ограничивают производительность всей системы, что было продемонстрировано на примере добычи нефти. Таким образом, Цифровая копия позволяет мгновенно идентифицировать "слабое звено" в цепочке создания ценности и с помощью симуляции «что, если?» просчитать оптимальный вариант перенастройки существующей системы (процессов, загрузки мощностей, логистики) для снятия ограничения и предложить вариант «расширения» системы.

*Концепция динамических способностей (Dynamic Capabilities)* говорит о способности организации адаптироваться к быстрым изменениям внешней среды. Это набор процессов в компании, которые позволяют компании своевременно

реагировать на изменения рынка, осваивать новые технологии и развивать инновации. Понятие "динамические способности" было введено Дэвидом Тисом (D. Teece), Г. Пизано (G. Pisano) и А. Шуеном (A. Shuen)[139], которые определили его как способность фирмы в грамотном использовании внутренних и внешних компетенций для существования на конкурентном рынке. В развитие этой концепции значительный вклад внесли также К. Эйзенхардт (K. Eisenhardt) и Дж. Мартин (J. Martin), рассматривавшие динамические способности как процессы использования ресурсов организации[140]. В условиях цифровизации экономики основным конкурентным преимуществом становится способность организации быстро адаптироваться к изменениям.

Цифровой двойник выступает инструментом реализации динамических способностей за счет интеграции и реконфигурации ресурсов. Появляется возможность не просто реагировать на среду, но и предвидеть поведение потребителя, изменяя продукты и сервисы на всем жизненном цикле для увеличения их полезности. Управление через цифровой двойник позволяет компании быстро перестраивать свои бизнес-процессы (архитектуру деятельности) в ответ на рыночные сигналы, которые модель улавливает и анализирует. В работе применение данной концепции продемонстрировано в параграфе 3.2, при демонстрации возможностей ЦД на месторождении «Газпром нефть».

*«Кибернетика 2.0»*— наука об общих закономерностях организации и управления системами, которую развивает российский ученый Д.А. Новиков[141]. Современное предприятие в ней рассматривается как динамическая система, объем информации в которой растет по экспоненте. Цифровой двойник в этой парадигме — это механизм управления сложной системой. Цифровой двойник становится платформой для оптимального управления этой сложной системой. Управление с помощью цифрового двойника помогает находить оптимальные траектории

[139] Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. Strategic Management Journal, 18(7), 509–533.

[140] Eisenhardt K. M., Martin J. A. Dynamic capabilities: what are they? // Strategic Management Journal. 2000. Vol. 21, Issue 10–11. Pp. 1105–1121.

[141] Новиков Д. А. Кибернетика 2.0 / Д.А. Новиков // Проблемы управления. – 2016 – № 1, стр. 73–81

развития системы, балансируя такие параметры, как время выполнения операций, состояние. В диссертационном исследовании применение данной концепции прослеживается в параграфах 3.2 и 3.3, где демонстрируется эффект от использования ЦД в промышленности, строительстве и эксплуатации объектов.

*Теория человеческого капитала и управления талантами.* Основоположниками теории человеческого капитала по праву считаются нобелевские лауреаты Гэри Беккер (Gary Becker) и Теодор Шульц (Theodore Schultz), а также Яков Минсер (Jacob Mincer).[142] Они исследовали зависимость доходов от природных способностей, знаний и навыков людей, доказав, что инвестиции в образование и здоровье эффективнее вложений в физический капитал.

В этой парадигме концепция цифровых двойников может быть распространена на управление персоналом. Здесь цифровой двойник работника — это гибридная модель, которая оценивает человеческий капитал: профессиональные, интеллектуальные и социальные способности. Управление осуществляется через формирование индивидуальной траектории профессионального развития. Алгоритмы машинного обучения с подкреплением подсказывают менеджеру, какие управленческие решения (обучение, мотивация, смена задач) необходимы для конкретного сотрудника с учетом динамики его здоровья, компетенций и мотивации. Это позволяет управлять производительностью на микроуровне и снижать риски выгорания и деструктивного поведения. Также оцениваются психомоторные, когнитивные и аффективные способности персонала для оптимизации деятельности. Далее в работе будут описаны проблемы с принятием цифровых технологий персоналом, эта концепция предлагает ее конкретное решение.

Имплементация данной теории в практике добывающих компаний и при управлении персоналом при эксплуатации зданий описана в параграфах 3.2 и 3.3.

[142] Girsh Linda, Budrin Aleksandr Talent management as a direction for the development of the organization's hu-man capital for creating innovations // January 2021- Economics and Environmental Management -DOI:10.17586/2310-1172-2021-14-1-76-84

*Стейкхолдер-менеджмент и институционально-аксиологический подход.*[143] Цифровой двойник организации (ЦДО) — это не только технология, но и часть цифровой экосистемы, включающей множество стейкхолдеров. Современные исследования определяют цифровую экосистему организации как сетевую систему взаимоотношений, построенную на ценностях и регулируемую институтами. Управляя объектом через цифровой двойник, менеджер должен учитывать более широкий контекст: как решения, принятые на основе данных цифровой модели, повлияют на сетевые коммуникации с партнерами, клиентами и обществом в целом (социальная и экологическая устойчивость). Управление перестает быть чисто инженерным и становится социально-техническим.

Применение данного подхода в работе прослеживается в параграфе 3.1, где демонстрируется взаимосвязь использования ЦД в различных отраслях и сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу.

*Применение критериев системного анализа к цифровым двойникам*

В данной работе цифровой двойник рассматривается не как IT-продукт, а как система управления предприятием. Используя классические критерии системного анализа (целостность, иерархичность, эмерджентность, функциональность, адаптивность), автор применяет их к цифровым двойникам и демонстрирует, что нарушение системных критериев приводит к феномену «цифрового фетишизма» — подмене реальной оптимизации имитацией.

Критерий целостности, то есть несводимости к сумме элементов, обозначает, что цифровой двойник должен быть больше, чем сумма 3D-модели объекта, датчиков, собирающих информацию, и программной аналитики.

Целостность возникает только при наличии обратной связи между физическим активом и его цифровой копией в реальном времени. Таким образом физический объект и его цифровая копия будут являться единой системой, изменения параметров одной части системы будет влиять на соответствующее синхронное изменение параметров другой части системы. Целостность цифрового двойника

[143] Freeman R. Edward / Strategic Management: A Stakeholder Approach// Cambridge University Press, 11 мар. 2010 г.

напрямую зависит от степени интеграции с системами управления предприятием (MES, ERP).

Как показало исследование ИТ-холдинга Т1[144] и Центра экспертизы «Сколково»[145], специализированные ИТ-решения классов MES, LIMS, QMS и PLM внедрены менее чем в половине российских компаний обрабатывающей промышленности, а разрыв между технологическими возможностями и управляемым результатом остается ключевой проблемой цифровизации. Таким образом, можно сделать вывод, что ЦД как система — это не модель, а замкнутый контур управления.

Согласно критерию иерархичности (вертикальная субординация), цифровой двойник должен быть встроен в иерархию более крупных систем. Например, для приведенного в третьей главе исследования примера месторождения нефти иерархию можно представить следующим образом: «датчики → агрегаты системы добычи, сепарации, хранения, транспортировки и т.п. → месторождение → предприятие → отрасль → экономика». Нижний уровень обеспечивает сбор данных, верхний — целевую функцию. Критерий нарушается, когда создают изолированные ЦД на уровне одного узла системы, но не интегрируют их в MES/ERP. Эксперты SILA Union (2025) отмечают, что на предприятиях появляются цифровые двойники, ИИ-модели и low-code-платформы, но ожидаемый эффект размывается, так как не обеспечивается взаимосвязь элементов системы друг с другом, данные дублируются, процессы остаются непрозрачными. Возникает системный парадокс: локальная оптимизация ведет к глобальным потерям (рост незавершённого производства в среднем на 15%)[146]. Повторим, создание цифрового двойника требует сквозной иерархии.

---

[144] ГК InfoWatch. Экспертно-аналитический центр «Россия: утечки информации ограниченного доступа, 2023-2025 гг.», [Электронный ресурс]. – URL: https://www.infowatch.ru/company/presscenter/news/utechki-dannykh-teryayut-prozrachnost (дата обращения: 19.04.2026 года).

[145] SILA Union. Итоги II Российского межотраслевого саммита «ПромIT: ИТ-новации для промышленности», декабрь 2025 [Электронный ресурс]. – URL: https://silaunion.ru/news/sila-union-na-mezhotraslevom-sammite-promit-cifrovye-iniciativy-v-promyshlennosti (дата обращения: 19.04.2026 года).

[146] ГК InfoWatch. Экспертно-аналитический центр «Россия: утечки информации ограниченного доступа, 2023-2025 гг.», [Электронный ресурс]. – URL: https://www.infowatch.ru/company/presscenter/news/utechki-dannykh-teryayut-prozrachnost (дата обращения: 19.04.2026 года).

Критерий эмерджентности или появления нового качества у системы, является ключевым для обоснования инвестиций. ЦД должен порождать свойство, отсутствующее у физического актива. · Примерами эмерджентности в приложении к ЦД могут быть: предиктивная аналитика (предупреждения о необходимости профилактики узла системы, например, насоса, до его выхода из строя); сценарная себестоимость (мгновенный пересчет цены продукта, например, нефти, при изменении курса валюты). Согласно модели Докукина, цифровые двойники обеспечивают принципиально новое качество — количественную оценку влияния на надежность оборудования и безопасность персонала через параметры интенсивности отказов и скорости восстановления.[147] Стоит отметить, что, если ЦД просто визуализирует температуру в скважине — это не система, а информационная панель. Экономического смысла в таком «двойнике» нет. Любая собранная информация должна быть использована для повышения качества анализа и сценарного анализа. Для собранной информации актуален критерий достаточности.

Критерий функциональности или целевой детерминации. Системный анализ требует четкого ответа: какую функцию в контуре производства/распределения выполняет ЦД. Можно выделить три функции. Первая – субституция или замещение дорогих натурных испытаний цифровыми симуляциями в ЦД (снижение R&D-затрат). Вторая - аугментация или дополнение человека при управлении нестационарными режимами работы. Достигаются выбор оптимального режима работы всей сложной системы, а также тотальное снижение аварийных простоев и числа выезда на объект (например, для профилактического осмотра агрегатов на месторождении). Теоретические подходы к анализу издержек в условиях цифровизации Института экономических стратегий[148] показывают, что использование цифровых двойников изменяет структуру производственных затрат и может обеспечить экспоненциальный экономический рост за счет эффекта

[147] Докукин А.В., Ломакин М.И., Ниязова Ю.М. и др. Модель анализа применения цифровых двойников для прогнозирования инцидентов и обеспечения безопасности труда в промышленности // Безопасность труда в промышленности. — 2025. — № 8. — С. 39–44 .

[148] Институт экономических стратегий. Theoretical concepts and methodological approaches to understanding production theory and cost analysis in the context of digitalization in microeconomics // MIC. — 2022. — №5 (106). — С. 62–68 .

масштаба. Третья - арбитраж или выявление скрытых резервов через сравнение виртуальной «эталонной» модели с реальной системой.

Критерий адаптивности реализуется ЦД посредством способности перестраиваться при изменении внешних условий (цены на энергию, спрос, логистика). Стоит отметить, что любая система, требующая перепрограммирования при каждом изменении тарифа на электроэнергию, нежизнеспособна. Адаптивный ЦД меняет алгоритм управления сам. Таким образом, ценность ЦД создается, в том числе, стоимостью предотвращенных потерь от недопроизводства или перепроизводства. Согласно отраслевым данным за 2025 г.,[149] цифровые двойники и предиктивная аналитика входят в число приоритетов российских промышленных компаний на ближайшие два года именно как инструменты адаптации к внешним ограничениям и кадровому дефициту. Чем выше волатильность рынка, тем быстрее окупается адаптивный двойник.

Границы системы также выступают критерием системного анализа, прежде всего в качестве исключения лишнего узла.  Включение в ЦД всей доступной информации может быть ошибкой, согласно этому критерию. Граница проходит там, где добавленная стоимость от включения нового потока данных становится ниже затрат на его обработку (предельная эффективность данных). · Если ЦД на 80% состоит из данных, которые никогда не используются, это нарушает системный принцип необходимого разнообразия Эшби — избыточное разнообразие не управляется, а хаотизирует. Без процессного и архитектурного подхода, как отмечают эксперты SILA Union за 2025,[150] цифровизация быстро превращается в набор несвязанных проектов с дублированием функций.

## 1.3 Типология, особенности, проблемы и перспективы развития технологии цифровых двойников

[149] SILA Union. Итоги II Российского межотраслевого саммита «ПромIT: ИТ-новации для промышленности», декабрь 2025 [Электронный ресурс]. – URL: https://silaunion.ru/news/sila-union-na-mezhotraslevom-sammite-promit-cifrovye-iniciativy-v-promyshlennosti (дата обращения: 19.04.2026 года).

[150] ГК InfoWatch. Экспертно-аналитический центр «Россия: утечки информации ограниченного доступа, 2023-2025 гг.», [Электронный ресурс]. – URL: https://www.infowatch.ru/company/presscenter/news/utechki-dannykh-teryayut-prozrachnost (дата обращения: 19.04.2026 года).

Прежде чем, рассмотреть типологию цифровых двойников и перспективы их развития, следует определить роль цифровых технологий в оптимизации бизнес-процессов

Одной из главных задач цифрового двойника является оптимизация бизнес-процессов.

По данным Большой Российской энциклопедии, под *оптимиза́цией* (от лат. optimum – наилучшее), процесс нахождения экстремума (глобального максимума или минимума) определённой функции или выбора наилучшего (оптимального) варианта из множества возможных. Наиболее надёжным способом нахождения наилучшего варианта является сравнительная оценка всех возможных вариантов (альтернатив). Если число альтернатив велико, при поиске наилучшей обычно используют методы математического программирования.[151]

Именно это является основной задачей цифровых двойников: выбор наилучшего варианта работы системы из множества возможных на основании имеющихся данных от реальной системы и рассчитанных встроенными алгоритмами.

В работе оптимизация продемонстрирована в ряде отраслей: добыче полезных ископаемых, строительстве, управлении городской инфраструктурой, сельском хозяйстве и комплексом зданий.

По данным журнала Нефтегаз[152], *оптимизация в добыче полезных ископаемых*:

1) выбор наилучшего варианта решения из множества возможных.

Имеется в виду анализ состояния исследуемой системы с точки зрения критерия оптимальности. Поиск «оптимума» и называется оптимизацией;

2) процесс приведения системы в наилучшее состояние.

В ходе оптимизации максимизируются выгодные характеристики и минимизируются расходы.

---

[151] Большая Российская энциклопедия. Электронный ресурс. Режим доступа: https://bigenc.ru/c/optimizatsiia-79076e (Дата обращения 2 мая 2026)

[152] Neftegaz.RU.Интернет-портал. Электронный ресурс. Режим доступа: https://neftegaz.ru/tech-library/economy/146658-optimizatsiya/ (Датат обращения: 2 мая 2026)

При этом в зависимости от критериев оптимальности различают оптимизацию векторную, многокритериальную, стохастическую и т. д.

*Оптимизация в сельском хозяйстве* — это комплекс мер, направленных на повышение эффективности производства, снижение затрат, улучшение использования ресурсов и обеспечение устойчивости агропромышленного комплекса. Она включает несколько ключевых направлений: логистику, землепользование, технологические инновации, управление ресурсами и персоналом.[153]

*Оптимизация управлением городской инфраструктурой* - это комплекс мер, направленных на повышение эффективности работы городских служб, рациональное использование ресурсов, улучшение качества жизни жителей и обеспечение устойчивого развития города. Она включает анализ текущих процессов, внедрение инновационных технологий, системное планирование и принятие обоснованных управленческих решений.[154]

*Оптимизация в строительстве* — это комплекс мероприятий, направленных на совершенствование процессов, снижение издержек и повышение эффективности на всех этапах реализации проекта. Это может включать как применение новых технологий, так и пересмотр методов планирования и управления.[155]

Анализ приведённых определений позволяет сделать обобщение и представить общую схему оптимизации бизнес-процесса с применением технологии цифрового двойника (см. рис 1.3.1).

---

[153] Шешунова Е. В. Многокритериальные системы оптимизации в агропромышленном комплексе / Е.В. Шещунова // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 1. С. 67–76.

[154] Росконгресс. «Умный город: как цифровые технологии меняют городскую среду и повседневную жизнь» [Электронный ресурс]. - https://roscongress.org/materials/umnyy-gorod-kak-tsifrovye-tekhnologii-menyayut-gorodskuyu-sredu-i-povsednevnuyu-zhizn/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения: 31.03.2026 год.)

[155] https://ragradus.ru/blog/optimizatsiya-stroitelnogo-proizvodstva-i-stoimosti-rabot




Рисунок 1.3.1. Схема оптимизации бизнес-процесса с помощью ЦД

*Источник: составлена автором*

AS-IS (от англ. «as is» — «как есть») — это модель, которая описывает текущее состояние бизнес-процессов в организации.

Как уже отмечалось, цифровая трансформация ведет к появлению новых цифровых технологий. Их использование, постоянное совершенствование способствует развитию цифровых моделей, которые отличаются по функциям, отраслям и сферам применения, наличию физического объекта, степени сложности, используемого комплекса технологий, характера управления и пр. Эти

особенности выступают в качестве критериев, по которым выделяют различенные типы цифровых двойников.

В зависимости от области применения выделят следующие типы цифровых двойников:

- цифровой двойник компонента (например, одной из деталей изделия);

- цифровой двойник объекта (актива) (например, насоса), включающий несколько цифровых двойников компонентов;

- цифровой двойник сложного (комплексного) объекта (например, самолета) включает двойники компонентов и двойники объектов. В первых трех случаях двойники мониторят состояние и оптимизируют работу в соответствие с заданными параметрами;

– цифровой двойник процесса — состоит из комплекса цифровых двойников объектов (активов) или цифровых двойников сложного объекта, в которых контролируются конкретные действия или операции.

В литературе можно встретить такую классификацию видов (ее описывал М. Гривс):

– прототип (DTP — Digital Twin Prototype) — виртуальный аналог реального объекта, который содержит все данные для производства, использования и утилизации;

– экземпляр (DTI — Digital Twin Instance) — содержит все данные о физическом объекте, в том числе 3D модель, и действует параллельно с оригиналом. Для нескольких физических объектов может быть разработан один цифровой двойник;

– агрегированный двойник (DTA — Digital Twin Aggregate) — это вычислительная система, объединяющая все цифровые двойники и реальные прототипы, которыми можно управлять из единого центра156 (например, национальной нефтяной компании Абу-Даби ADNOC, используя цифровой

[156] Что такое цифровой двойник и как это связано с Big Data [Электронный ресурс]. — URL: https://bigdataschool.ru/blog/digital-twin-plm-iot-big-data/ (дата обращения: 07.11.2025).

двойник, удалось собрать в единый диспетчерский пункт 20 нефтеперерабатывающих и нефтедобывающих предприятий)[157].

Наряду с вышеназванными тремя типами двойников в литературе можно встретить еще два:

– гибридный цифровой двойник (HDT — Hybrid Digital Twin) — основывается на нескольких передовых технологиях и может использоваться для прогнозирования изменений функционала в будущем;

– комплексный двойник (DTO — Digital Twin of Organization — как результат развития HDT) — использует все технологии моделирования, обработки данных, визуализации[158] и др.

Есть и глобальные проекты — построение «национального цифрового двойника» — (NDT — National Digital Twin)[159]. Это симулятор, который позволяет увидеть, как могут выглядеть проводимые в разных сферах жизни реформы (образования, здравоохранения, энергетики и др.) и как они сочетаются друг с другом. Он помогает избежать дорогостоящих ошибок и решает проблему разрозненного мышления, когда люди сосредоточены только на своей области деятельности и не работают вместе для создания согласованного видения[160].

По выполняемым функциям С.И. Петренко выделяет цифровые двойники пассивного мониторинга; предикативные (прогнозные) цифровые двойники и интерактивные (диалоговые) цифровые двойники[161].

---

[157] Что такое цифровые двойники и где их используют [Электронный ресурс]. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb?from=copy (дата обращения: 07.11.2025).

[158] Виды цифровых двойников : что такое цифровой двойник, как и зачем их использовать бизнесу [Электронный ресурс]. — URL: https://www.calltouch.rublog/chto-takoe-czifrovoj-dvojnik-kak-i-zachem-ih-ispolzovat-biznesu/?ysclid=lv54gp7225898639083 (дата обращения: 15.02.2025).

[159] Прохоров А. Цифровой двойник : анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. — 1-е изд., испр. и доп. — Москва : АльянсПринт, 2020. — 401 с.

[160] NZ Fry Up: National digital twin on the agenda, with smarter construction one benefit; Digital communications minister taking charge [Электронный ресурс]. — URL: https/www.computerworld.com/article/1614836/nz-fry-up-national-digital-twin-on-the-agenda-with-smarter-construction-one-benefit-digital-communi.html (дата обращения: 15.02.2025).

[161] Оценка влияния внедрения цифрового двойника на эффективность бизнес-процессов промышленного предприятия [Электронный ресурс]. — URL: http://elar.urfu.ru/handle/10995/109399 (дата обращения: 07.11.2025).

О.В. Гостева и О.В. Пацук в статье «Особенности применения цифровых двойников на российских промышленных предприятиях» по масштабу применяемых технологий выделяют:

1. «Цифровые фабрики, которые в состоянии заниматься моделированием продукции или производства с помощью: гибридных и аддитивных технологий, цифрового моделирования и проектирования. В фабриках такого типа происходит цифровая сертификация, так как проводимые испытания происходят только в виртуальном формате.

2. Умные фабрики, использующие не только гибкое производство, но и автоматизацию процессов, и обеспечивающие массовую кастомизацию.

3. Виртуальные фабрики используют технологии предыдущих двух типов фабрик, что позволяет им эффективно управлять цепочками поставок»[162].

Цифровые двойники различаются и по уровню зрелости. Это связано с тем, что на разных этапах эволюции цифрового двойника появлялись новые технологии, на которых он строился.

Согласно концепции компании Microsoft, до 2002 г. развивались и использовались технологии 3D-моделирования и компьютерного цифрового управление; с 2003 по 2013 гг. — такие технологии, как виртуальная сборка, цифровое имитационное моделирование; с 2014 по 2016 гг. — IoT, Big Data-аналитика, облака; с 2017 г. — дополненная и виртуальная реальность, голография, искусственный интеллект, человеко-машинное взаимодействие, автономная работа двойников и самовосстановление[163].

Машинное обучение и его приложение в виде компьютерного зрения — главная сила современных цифровых двойников. Его задача — давать системам искусственного интеллекта изображение для анализа[164] и научить искусственный

---

[162] Гостева О.В. Особенности применения цифровых двойников на российских промышленных предприятиях [Электронный ресурс] / О.В. Гостева, О.В. Пацук. — URL: https://research-journal.org/archive/8-134-2023-august/10.23670/IRJ.2023.134.14?ysclid=lvks1tqb6l261026543 (дата обращения: 07.11.2025).

[163] Прохоров А. Цифровой двойник : анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. — 1-е изд., испр. и доп. — Москва : АльянсПринт, 2020. — 401 с.

[164] От моделей до предсказаний: что могут цифровые двойники и кто их создает [Электронный ресурс]. — URL:

интеллект интерпретировать данные способом, который сопоставим с тем, как человеческий глаз обрабатывает информацию[165].

Итак, по уровню зрелости, характеру управления и возможности использования машинного обучения различают следующие типы цифровых двойников, которые представлены в таблице.

Таблица 1.3.1. Классификация цифровых двойников по комплексу критериев[166]

| Модель | Степень сложности модели | Физический близнец | Управление | Машинное обучение на данных, собранных на объекте | Машинное обучение на данных, собранных об объекте и окружающей среде |
|---|---|---|---|---|---|
| Доцифровой двойник или цифровой двойник на стадии проектирования | Высокоточная модель, виртуальный прототип | Не существует | Не применимо | Нет | Нет |
| Цифровая тень | Виртуальная модель физического близнеца без 3D | существует | Просмотр данных в режиме реального времени на дашбордах | Нет | Нет |
| Цифровой двойник (синхронизированный), уточнен на основе цифровой тени | Виртуальная модель физического близнеца с 3D | существует | Просмотр данных в режиме реального времени на 3D-модели | Нет | Нет |
| Управляемый (адаптивный) цифровой двойник | Виртуальная модель физического близнеца с интерфейсом | существует | Просмотр данных в режиме реального времени, сохранение и | Да | Нет |

https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/637b31bc9a794783c9258e82 (дата обращения: 07.11.2025).

[165] Разница между компьютерным зрением и машинным обучением [Электронный ресурс]. — URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.592e360e-662f6392-b4c16489-74722d776562/https/www.tutorialspoint.com/difference-between-computer-vision-and-machine-learning (дата обращения: 07.11.2025).

[166] Составлено автором по: Шкрабовская А.Ю. Инновационные технологии в строительстве / А.Ю. Шкрабовская, Р.Г. Абакумов // Инновационная наука. — 2017. — № 4–3.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | управления (CAFM) | | анализ данных, ручное управление | | |
| Умный (интеллектуальный) цифровой двойник | Виртуальная модель физического близнеца с интерфейсом управления (CAFM) и модулем предсказания инцидентов | существует | Просмотр данных с датчиков, расположенных внутри и снаружи объекта в режиме реального времени, сохранение и анализ данных, автоматическое управление | Да | Да[167] |

В целом цифровые двойники отличаются подходом к интеграции данных и входным данным из реального мира.

В 2000-х годах в науке появилось понятие гибридный двойник, как технологическая разновидность цифрового двойника, основанного на объединении технологий имитационного численного моделирования машинного обучения, интернета вещей. На практике гибридный двойник был реализован компанией ESI, которая разрабатывает и реализует ПО для создания компьютерных моделей и виртуальных прототипов изделий.

Гибридный двойник в дальнейшем нашел свое развитие в так называемом комплексном двойнике. Комплексный двойник — это современный вариант двойника, который содержит всю совокупность современных технологий для решения задач предсказательного обслуживания объектов, эффективной их эксплуатации и оптимального использования ресурсов, особенно людских[168].

Цифровые двойники выполняют следующие функции:

1. Оперативное и малозатратное проведение тестирования актива.

2. Обнаружение проблем и уязвимостей до запуска производства или введения объекта в эксплуатацию.

---

[167] Шкрабовская А.Ю. Инновационные технологии в строительстве / А.Ю. Шкрабовская, Р.Г. Абакумов // Инновационная наука. — 2017. — № 4–3.

[168] Цифровой двойник Digital Twin of Organization, DTO [Электронный ресурс]. — URL: https://clck.ru/3QEZwK (дата обращения: 07.11.2025).

3. Повышение эффективности работы всех процессов или систем.

4. Снижение технологических, эксплуатационных, финансовых рисков, обеспечение безопасности жизни и здоровья людей.

5. Рост конкурентоспособности организаций и результативности бизнеса.

6. Прогнозирование деятельности организации.

7. Наиболее полное удовлетворение потребностей клиентов[169].

Действительно, цифровые двойники стимулируют развитие современных компаний практически во всех отраслях и сферах деятельности, благодаря использованию новых подходов к принятию решений.

Технология цифровых двойников особенно эффективна на предприятиях, где производится продукция с долгим жизненным циклом, ее техническое обслуживание затруднено и требуется высококвалифицированный сервис[170].

На предприятиях реального сектора цифровые двойники выявляют «узкие» места, составляют рациональные производственные графики, рассчитывают оптимальные размеры партий изделий, помогают качественно планировать объемы производства, экономят время и ресурсы на разработку или модернизацию актива[171], стимулируют внедрение проактивного подхода к управлению на основе данных и предиктивной аналитики[172], оценивают целесообразность внедрения того и ли иного проекта и др.

Технология цифровых двойников используется практически повсеместно.

---

[169] Что такое цифровые двойники и где их используют [Электронный ресурс]. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb?from=copy (дата обращения: 07.11.2025).

[170] Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4. — С. 35–43. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-istoriya-vozniknoveniya-i-perspektivy-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.11.2025).

[171] Цифровые двойники: следующий рубеж оптимизации производства [Электронный ресурс]. — URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization (дата обращения: 05.11.2025).

[172] Цифровые двойники в промышленности: что это, как их развивают в России и какие предприятия используют [Электронный ресурс] // Промышленные страницы. — URL: https://indpages.ru/solutions/czifrovye-dvojniki-v-promyshlennosti/?ysclid=luvheo8s8a613987316 (дата обращения: 14.11.2025).

Автомобильные компании используют цифровых двойников для разработки новых моделей; в розничной торговле они применяются для эффективного мерчендайзинга; в нефтегазовой — для проектирования разработки месторождений; в транспортной — для оптимизации логистики перевозок; в медицине — для подбора правильного лечения и успешного проведения операций, прогнозирования эпидемиологических ситуаций; в сельском хозяйстве — для учета изменения климатических условий и повышения урожайности; в энергетике — для предотвращения сбоев в подаче электроэнергии и обеспечения рационального энергопотребления; в дизайне — для проектирования интерьера помещений; в городской среде — для решения городских проблем; в авиакосмической — для разработки и тестирования новых моделей воздушных судов и космических кораблей и т.д.

По мнению исследователей, в результате значительных успехов экономического развития России в последние несколько лет, пришло время перейти от импортозамещения к импортоопережению. Это касается не только продукции отраслей промышленности, но и цифровых продуктов — пора планировать не только их создание, но и их масштабирование на другие страны. Российским стандартом цифровых двойников уже заинтересовались во многих странах, т.е. в скором времени может появиться новый экспортный товар — стандарт[173].

Расширение функционала и возможностей цифровых двойников в последние годы можно объяснить следующими причинами:

- появление новых цифровых технологий;

- совершенствование имеющихся цифровых инструментов;

- усиление интеграции виртуального и реального миров;

- совершенствование отраслевых стандартов IoT, аппаратного комплекса для ПО, развитие платформенных решений;

---

[173] Ледяева М. Как устроены цифровые двойники и зачем они нужны [Электронный ресурс] // RG.RU. — 28.12.2021. — URL: https://rg.ru/2021/12/28/reg-szfo/kak-ustroeny-cifrovye-dvojniki-i-zachem-oni-nuzhny.html?ysclid=luvijdfsk3912366876 (дата обращения:15.03.2025).

- повышение уровня визуализации данных;

- совершенствование аппаратного инструментария и ПО (в плане улучшения работы внешних и встроенных датчиков; сетевых технологий и обеспечения кибербезопасности);

- возможность доступа к недорогим вычислительным мощностям, сетям и хранилищам[174].

Преимущества цифровых двойников очевидны, однако их внедрение сопряжено с рядом проблем и трудностей.

Одной из основных трудностей является сложность, затратность и длительность процессов цифровизации всех объектов и бизнес-процессов, имеющихся и планируемых производств. Не все предприятия могут с этим оперативно справиться.

Далее. Цифровая трансформация влечет за собой риски, связанные с утечкой информации, кражей данных, использованием вредоносных программ и вирусов, угрозой нарушения конфиденциальности и т.д. Это значит, что важной проблемой становится обеспечение информационной безопасности, если цифровые двойники действительно претендуют на роль современных инструментов управления. Очень остро этот вопрос стоит в отношении организаций оборонно-промышленного комплекса, атомной энергетики, высокотехнологичных производств и др.

Требуется достижение соответствия таких общепринятых показателей информационной безопасности как конфиденциальность и доступность реальным объектам управления. В отношении двойников стоит вопрос о таком показателе, как целостность, поскольку они отражают изменяющиеся объекты[175].

---

[174] Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4. — С. 35–43. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-istoriya-vozniknoveniya-i-perspektivy-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.11.2025).

[175] Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства [Электронный ресурс] / Н.В. Курганова и др. // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Vol. 7, no. 5. — P. 105–115. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyh-dvoynikov-kak-odno-iz-klyuchevyh-napravleniy-tsifrovizatsii-proizvodstva?ysclid=luvfkxlsmt157138445 (дата обращения: 06.11.2025).

Наряду с указанными угрозами специалисты считают, что одной из новых угроз в связи с использование цифровых двойников является создание неадекватной цифровой модели. Именно этим объясняется неудача с запуском ракетоносителя с космодрома «Восточный» в 2017 г.: модель взлета рассчитывалась для космодрома «Байконур»[176].

В качестве трудностей следует отметить недостаток высококвалифицированных специалистов в области создания и внедрения цифровых двойников.

Препятствиями на пути внедрения цифровых двойников называют также отсутствие информации у руководителей организаций об их возможностях, сложности с хранением больших данных и неумением работать с ними[177].

Трудности с использованием цифровых двойников могут быть связаны с качеством данных, количеством наблюдений, частотой и погрешностями замеров. То есть эффективность эксплуатации актива зависит не только от использования двойника, но и от состояния используемого физического оборудования[178].

Немаловажным является передача информации без задержки и искажений, совместимость с имеющейся IT-системой[179].

Исследователи указывают и на организационные трудности — цифровой двойник должен быть включен в систему управления, где четко

---

[176] Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства [Электронный ресурс] / Н.В. Курганова и др. // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Vol. 7, no. 5. — P. 105–115. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyh-dvoynikov-kak-odno-iz-klyuchevyh-napravleniy-tsifrovizatsii-proizvodstva?ysclid=luvfkxlsmt157138445 (дата обращения: 06.11.2025).

[177] Digital twins: The next frontier of factory optimization [Электронный ресурс] / S. Camarella et al. // Mckinsey & Company. — URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization (дата обращения: 07.11.2025).

[178] Двойники в сетях: как цифровизация меняет энергетику России [Электронный ресурс]. — URL: https://sber.pro/digital/publication/dvojniki-v-setyah-kak-cifrovizaciya-menyaet-energetiku-rossii/?ysclid=luvh7mq7ze148269102 (дата обращения: 07.09.2025).

[179] Цифровое раздвоение: рассказываем о технологии «Цифровой двойник» [Электронный ресурс]. — URL: https://dprom.online/oilngas/tsifrovoe-razdvoenie-o-tehnologii/?ysclid=luvhqzyauo980834096 (дата обращения: 07.09.2025).

регламентированы все бизнес-процессы, определена ответственность за принятие решений и прописаны соответствующие действия персонала[180].

В целом любое новое явление появляется и внедряется не сразу и повсеместно, а преодолевая определенные трудности и препятствия. Не являются исключением и цифровые двойники. Тем не менее, у них определенно большое будущее. Уже сегодня в промышленности двойники помогают повысить эффективность производства примерно на 10%[181]. Около 20% ведущих мировых промышленных предприятий в настоящее время уже используют цифровые двойники в своем бизнесе и техпроцессах. Более 250 российских предприятий планируют внедрить технологии цифрового двойника к 2024 году[182].

Эксперты считают, что скоро потребители смогут пользоваться цифровыми двойниками в быту.

Например, автовладелец, используя любой гаджет, наведенный на автомобиль, сможет получить необходимую информацию о состоянии всех систем машины, времени очередного техобслуживания[183] и т.п.

Уже сейчас ученые разрабатывают цифровую копию человека — «нейродвойник», который поможет отслеживать физическое состояние пациента и предупреждать риски появления заболеваний. Доктора в скором будущем смогут в онлайн-режиме следить за показателями здоровья пациентов[184], вовремя назначая необходимое лечение.

---

[180] Цифровое раздвоение: рассказываем о технологии «Цифровой двойник» [Электронный ресурс]. — URL: https://dprom.online/oilngas/tsifrovoe-razdvoenie-o-tehnologii/?ysclid=luvhqzyauo980834096 (дата обращения: 07.09.2025).

[181] Что такое цифровые двойники и где их используют [Электронный ресурс]. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb?from=copy (дата обращения: 07.11.2025).

[182] Меньшаева А.А. Развитие цифровых двойников в российской промышленности [Электронный ресурс] / А.А. Меньшаева // Молодой ученый. — 2021. — № 11 (353). — С. 25–27. https://moluch.ru/archive/353/79138/ (дата обращения: 07.11.2025).

[183] Цифровой двойник: экспериментируя с будущим [Электронный ресурс]. — URL: https://rostec.ru/news/tsifrovoy-dvoynik-eksperimentiruya-s-budushchim/?ysclid=luvib35q5x816748775 (дата обращения: 08.10.2025).

[184] Как цифровые двойники помогают российской промышленности [Электронный ресурс]. — URL: https://rb.ru/longread/digital-twin/ (дата обращения: 09.10.2025).

В России развитие технологии цифровых двойников вызвано объективной потребностью в росте эффективности производства в условиях глобальных вызовов и выполнения поставленных задач достижения технологического суверенитета страны.

Работы по созданию и внедрению цифровых двойников в стране ведутся в рамках заявленных 18 направлений концепции технологического развития России до 2030 года, среди которых указаны развитие искусственного интеллекта и квантовых коммуникаций.

Разработки идут в направлении создания отечественных платформ для цифровых двойников, что позволит снизить зависимость от зарубежных разработок и адаптировать технологии под специфику российского производства[185].

Важным на пути продвижения цифровых двойников эксперты считают необходимость создания межотраслевых стандартов, обеспечение совместимости технологий, стимулирование государственно-частного партнерства для инвестирования в НИОКР.

У цифровых двойников есть значительный потенциал для роста за счет кооперации с другими технологиями. Так, блокчейн, взамен использования разрозненных баз данных, может позволить получать информацию в объемах, достаточных для создания адаптивных цифровых двойников. А в целом для масштабирования использования развитие технологии должно идти в направлении обеспечения ее доступности, упрощения использования, расширения функционала.

Исследователи просматривают такие интересные и востребованные направления развития технологии, как, например, появление цифровых двойников, предоставляющихся по сервисной модели (DTS — Digital Twin as a Service). Вместо того, чтобы каждый раз делать продукт с нуля, можно выявить общие принципы,

---

[185] Цифровые двойники в промышленности: что это, как их развивают в России и какие предприятия используют [Электронный ресурс]. — URL: https://indpages.ru/solutions/czifrovye-dvojniki-v-promyshlennosti/?ysclid=luvheo8s8a613987316 (дата обращения: 07.11.2025).

разработать универсальный «каркас», который можно будет адаптировать под желания заказчика и предоставлять его по сервисной модели по приемлемой цене[186].

Что касается прогнозов развития рынка цифровых двойников, то к 2026 году его размер достигнет 48,2 млрд долларов США и будет расти со среднегодовым темпом роста 58%. По данным информационного отчета Всемирного экономического форума за 2022 год, к 2030 году применение технологии цифровых двойников позволит сэкономить 280 миллиардов долларов на городском планировании, строительстве и эксплуатации[187].

Подводя итог содержанию первой главы, следует отметить, что развитие процессов цифровизации способствовало грандиозным изменениям во всех сферах жизнедеятельности современного общества. Появление цифровых инструментов привело к необходимости изменения концепции управления производством, трансформации образа жизни людей.

В современных условиях для сохранения конкурентоспособности организации должны менять стратегию деятельности, реструктуризировать бизнес-процессы, активно использовать инновации, передовые цифровые инструменты, одним из которых является цифровой двойник.

По поводу понимания сущности цифрового двойника в отечественной и зарубежной научной литературе нет единства мнений. Исследователи определяют его как модель или копию физического объекта; есть понимание двойника и как процесса моделирования объектов. Тем не менее, практически все говорят о взаимодействии физических и виртуальных объектов, об использовании численного моделирования, важности использования двойника для принятия решения об оптимизации процессов.

---

[186] От моделей до предсказаний: что могут цифровые двойники и кто их создает [Электронный ресурс]. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/637b31bc9a794783c9258e82 (дата обращения: 07.08.2025).

[187] Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4. — С. 35–43. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-istoriya-vozniknoveniya-i-perspektivy-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.11.2025).

В главе предложено авторское определение цифрового двойника: это виртуальная модель (прототип) физического объекта, динамично меняющаяся(ийся) в результате постоянного автоматического обмена данными и информацией между ними благодаря наличию связанной сквозными технологиями многослойной конструкции, предназначенная(ый) для определения и предсказания проблем объекта и моделирования вариантов их решений с целью оптимизации деятельности субъекта.

В техническом плане цифровой двойник представляет собой многослойную конструкцию, включающую: физический, цифровой, программный и киберслои, которые, взаимодействуя, позволяют ему работать в режимах видеть, думать и делать.

Цифровые двойники отличаются по многих классификационным характеристикам. Их функционал достаточно большой и продолжает расширяться. Преимущества двойников бесспорны, почему спектр их применения растет.

Они могут повысить эффективность деятельности организаций, снизить их затраты, избавить от потенциальных проблем, благодаря использованию сценария «что-если», давая возможность заглянуть в будущее.

Вместе с тем у технологии есть трудности и проблемы с разработкой и внедрением. Поэтому для дальнейшего успешного ее развития требуются соответствующие исследования, доработки, включая установление нормативно-правовой базы функционирования.

Технология цифрового двойника меняет всю философию управления и, прежде всего, подход к принятию решений. Оперативная реакция на полученную от двойника информацию — это залог обеспечения прочных конкурентных позиций на рынке. Следовательно, рано или поздно, но эта технология станет обязательным инструментом управления организацией, помогая делать объекты более управляемыми, освобождая людей от ряда функций, которые цифровой двойник может делать качественнее.

# ГЛАВА 2. ПРОЦЕССЫ ИНТЕГРАЦИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИЯМИ В РОССИЙСКОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ПРАКТИКЕ

## 2.1. Особенности и перспективы развития российского рынка цифровых двойников

Динамика развития рынка цифровых двойников (ЦД) обусловлена комплексом структурных, технологических, нормативных и социально-экономических факторов, которые в совокупности формируют устойчивый спрос на данные технологии как на глобальном, так и на национальном уровне.

Во-первых, глобальная повестка устойчивого развития, закреплённая в резолюции Генеральной Ассамблеи ООН «Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года»[188], оказывает прямое влияние на трансформацию промышленных практик. Цели устойчивого развития (ЦУР), в частности ЦУР 9 («Создание устойчивой инфраструктуры, стимулирование инновационной деятельности и обеспечение промышленной модернизации») и ЦУР 13 («Принятие неотложных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями»), требуют кардинальной модернизации производственных процессов и внедрения инновационных решений, минимизирующих экологический след. Цифровые двойники позволяют достигать социальных, экологических и технологических эффектов одновременно, выступая в качестве инструмента для устойчивой цифровой трансформации[189].

Во-вторых, формирование новой системы эколого-экономического регулирования, в частности введение углеродного налога (Carbon Tax), создаёт

---

[188] Захаров В. М. Устойчивое развитие: экология, экономика, общество и культура: учебник / В. М. Захаров, А. В. Семенов, И. Е. Трофимов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Московский университет им. С. Ю. Витте / Центр устойчивого развития и здоровья среды ИБР РАН, 2023. — 212 с.

[189] Кравченко А. А. Особенности развития рынка цифровых двойников // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2024. Т. 14, № 6. С. 283–294.

прямые финансовые стимулы для оптимизации энерго- и ресурсо-потребления[190]. Цифровые двойники позволяют без физического вмешательства в технологический процесс проводить детальное моделирование энергетических и логистических цепочек, оперативно выявлять «узкие места» и предлагать корректирующие меры, что напрямую снижает углеродоёмкость производства[191]. Например, в кейсе «Газпром нефть» с помощью цифровых двойников, интегрированных с ИИ-алгоритмами, осуществляется пересчёт тысяч вариантов эксплуатации скважин в режиме реального времени, что обеспечивает выбор наиболее энергоэффективного режима добычи и снижает выбросы.

В-третьих, технологическая зрелость самих решений и их интеграция в экосистемы Индустрии 4.0 (Интернет вещей, IIoT, облачные вычисления, блокчейн, человеко-машинные интерфейсы) значительно снижает порог входа для реализации проектов[192]. По данным MarketsandMarkets, технология ЦД представляет собой конвергенцию передовых решений, обеспечивающих двусторонний обмен данными между физической и виртуальной частями[193]. Это позволяет, например, в проекте ОАО «РЖД» по цифровому двойнику Московского центрального кольца интегрировать статичные (инфраструктура), динамичные (подвижной состав) и управленческие компоненты в единую предиктивную систему.

В-четвёртых, растущая сложность инженерных объектов и цепочек поставок требует новых подходов к проектированию и управлению жизненным циклом продукции (PLM). Как справедливо отмечает Прохоров А., традиционная

---

[190] Тюрина Ю. Г. Зарубежный опыт налогообложения выбросов в атмосферный воздух: экономическое значение и направления реформирования [Электронный ресурс] / Ю. Г. Тюрина, М. А. Троянская // Финансы и кредит. — 2018. — Т. 24, № 5. — С. 1005–1015. — URL: https://www.fin-izdat.com/journal/fc/detail.php?ID=72826 (дата обращения: 10.03.2024).

[191] Там же

[192] Кравченко А. А. Особенности развития рынка цифровых двойников // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2024. Т. 14, № 6. С. 283–294.

[193] MarketsandMarkets. Digital twin market size, share, statistics and industry growth analysis report by application. URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html (дата обращения: 11.09.2024).

парадигма проектирования, основанная на последовательной передаче данных между изолированными подразделениями, уступает место интегрированной цифровой среде, где ЦД выступает единым источником достоверной информации[194]. Эта тенденция особенно заметна в аэрокосмической, энергетической и медицинской отраслях, где ошибки в проектировании могут привести к катастрофическим последствиям[195].

Наконец, экономические эффекты от внедрения ЦД подтверждены как теоретически, так и эмпирически. По данным Dassault Systèmes, ключевыми драйверами внедрения являются: повышение качества продукции, снижение производственных издержек и сокращение незапланированных простоев[196]. По оценкам Sinitsyn S. N., комплексное применение цифровых двойников позволяет одновременно:

- сократить производственные издержки и ускорить вывод продукции на рынок,
- повысить рентабельность инвестиций (ROI),
- снизить долю ручного труда и улучшить условия труда,
- минимизировать количество простоев и уровень брака,
- снизить затраты на техническое обслуживание за счёт предиктивной аналитики[197].

Экономическая целесообразность проектов подтверждается и расчётами: при стоимости создаваемой технологической системы свыше 150 тыс. евро применение цифрового двойника позволяет сократить расходы на разработку на 25–30%,

---

[194] Прохоров А. Цифровой двойник: анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. — 1-е изд., испр. и доп. — Москва: АльянсПринт, 2020. — С. 127–129.

[195] Боровков А. И. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. — 492 с.

[196] Digital Twin Use Cases in Manufacturing [Электронный ресурс]. — URL: https://blogs.3ds.com/exalead/2019/07/03/digital-twin-use-cases-in-manufacturing-part-5-12

[197] Синицын С. Н. Цифровые двойники как инструмент формирования бизнес-среды современных организаций // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. — 2024. — Т. 20, № 9 (438).

несмотря на высокую начальную капитализацию (от 50 тыс. евро и выше)[198]. При этом важно подчеркнуть, что окупаемость достигается не за счёт разового эффекта, а через непрерывную оптимизацию бизнес-процессов в течение всего жизненного цикла объекта[199]

Таблица 2.1.1. Структура внутренних затрат на исследования и разработки в области ИКТ по источникам финансирования[200]

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| В действующих ценах,% | | | | | | |
| Всего | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Средства бюджетов всех уровней | 61,7 | 61,4 | 62,3 | 58,5 | 54,1 | 47,4 |
| Федеральный бюджет | 61,1 | 60,6 | 56,9 | 56,7 | 53,1 | 46,7 |
| Собственные средства | 16,2 | 15,6 | 17,1 | 20,9 | 18,2 | 27,1 |
| Собственные средства организаций государственного сектора | 9,6 | 8,9 | 5,3 | 4,9 | 9,5 | 9,8 |
| Собственные средства организаций предпринимательского сектора | 10,2 | 11,7 | 13,0 | 12,2 | 15,1 | 13,3 |
| Прочие источники | 2,3 | 2,4 | 2,3 | 3,5 | 3,2 | 2,3 |

Конечно, стимулировать развитие цифровых двойников могло бы бюджетное финансирование в рамках государственных программ и проектов. Как отмечают эксперты, для того чтобы наука могла вносить свой вклад в решение проблем технологического суверенитета в наукоемких отраслях экономики, внутренние затраты на исследования и разработки должны увеличиться к 2030 г. на 45%[201]. С

[198] What is the value of a Digital Twin? High Tech Software Cluster [Электронный ресурс]. — URL: https://hightechsoftwarecluster.nl/paper/what-is-a-digital-twin-and-what-value-does-it-deliver/ (дата обращения: 28.05.2025).

[199] Цифровые двойники в промышленности: возможности, перспективы, риски [Электронный ресурс]. — URL: https://umbrellait.ru/blog/czifrovye-dvojniki-v-promyshlennosti-vozmozhnosti-perspektivy-riski/ (дата обращения: 07.11.2025).

[200] Индикаторы цифровой экономики : 2024 : статистический сборник / В.Л. Абашкин и др. — Москва : ИСИЭЗ ВШЭ, 2024. — 276 с.

[201] Правительство России утвердило «Концепцию технологического развития до 2030 г.» [Электронный ресурс] // Министерство науки и высшего образования РФ. — 25.05.2023. — URL:

учетом современных тенденций этот показатель кажется невыполнимым. В современных условиях расходы на науку в ВВП опустились в 2022 г. до беспрецедентно низкой отметки в 0,94%, что стало падением даже по сравнению с низкими показателями 2021 г. (0,96% ВВП). Это примерно соответствует уровню 1998 г. (0,95%), когда в стране был серьезный экономический кризис. В 2023 г. затраты на науку были ниже 1% ВВП[202]. При этом в текущих ценах эти затраты росли, а в постоянных ценах сократились за год на 4,7%[203]. Структура расходов по источникам финансирования практически не изменилась. Более 2/3 внутренних затрат на НИОКР (67,3%) финансировались за счет средств государства, на долю предпринимательского сектора пришлось 28,9%, что стало снижением по сравнению с предыдущим годом. В постоянных ценах объем средств предпринимательского сектора на НИОКР сократился на 5,1%.

Согласно Федеральному закону «О федеральном бюджете на 2024 г. и на плановый период 2025 и 2026 гг.» бюджетные ассигнования на прикладные научные исследования будут сокращаться.

---

https://minobrnauki.gov.ru/ press-center/news/novosti-ministerstva/68378 (дата обращения: 07.11.2025).

[202] Наука : технологии : инновации : 2024 : краткий стат. сб. — Москва : ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, 2024. — С. 42.

[203] Мартынова С. Финансирование российской науки в новых условиях : итоги 2022 г. [Электронный ресурс] / С. Мартынова, Т. Ратай // Наука. Технологии. Инновации. Экспресс-информация. — ИСИЭЗ НИУ ВШЭ. — 02.11.2023. — URL: https://issek.hse.ru/news/870116078.html (дата обращения: 07.11.2025).

Таблица 2.1.2. Бюджетные ассигнования на прикладные исследования по приоритетным направлениям технологического развития на 2024–2026 гг., млрд руб.[204]

| Наименование федерального проекта | 2024 год | 2025 год | 2026 год |
|---|---|---|---|
| «Развитие технологий производства электроники» | 5,0 | 3,7 | 3,7 |
| «Прикладные исследования, разработка и внедрение электронной продукции» | 16,4 | 16,4 | 16,4 |
| «Содействие проведению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в гражданских отраслях промышленности» | 10,0 | 12,3 | 12,3 |
| «Развитие отечественного приборостроения гражданского назначения для научных исследований» | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| «Развитие производства новых материалов» | 1,3 | 0,0 | 0,0 |
| «Чистая энергетика» | 1,5 | 1,5 | 2,5 |
| «Новая атомная энергетика, в том числе малые атомные реакторы для удаленных территорий» | 8,4 | 6,7 | 9,1 |
| «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» | 13,0 | 8,9 | 4,1 |
| «Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем» | 2,5 | 2,3 | 0,0 |

[204] Государственная программа «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» : базовые бюджетные ассигнования на реализацию государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации в 2024–2026 годах» [Электронный ресурс] // СПС Консультант Плюс. — URL: https://sudact.ru/law/metodika-rascheta-predelnykh-bazovykh-biudzhetnykh-assignovanii-federalnogo_2/metodika/2/gosudarstvennaia-programma-nauchno-tekhnologicheskoe-razvitie-rossiiskoi/ (дата обращения: 11.10.2025).

Еще одним барьером на пути разработки и внедрения цифровых двойников является дефицит квалифицированных специалистов, обладающих междисциплинарными знаниями.

Таблица 2.1.3. Выпуск бакалавров, специалистов, магистров по ключевым укрупненным группам направлений подготовки и специальностей в сфере информационных технологий и смежных областей образования, связанных с интенсивным использованием ИКТ (тыс. чел.)[205]

| | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|
| Всего | 220,7 | 208,2 | 209,9 |
| Математика и механика | 8,1 | 7,9 | 8,9 |
| Компьютерные и информационные науки | 3,4 | 3,2 | 3,4 |
| Информатика и вычислительная техника | 30,3 | 31,1 | 35,3 |
| Информационная безопасность | 4,6 | 4,9 | 5,6 |
| Электроника, радиотехника и системы связи | 12,5 | 12,2 | 11,9 |
| Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии | 4,4 | 4,0 | 3,9 |
| Авиационная и ракетно-космическая техника | 3,6 | 3,9 | 4,1 |
| Аэронавигация и эксплуатация авиационной и ракетно-космической техники | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Управление в технических системах | 11,0 | 9,7 | 9,7 |

Исходя из статистических данных, несмотря на острую потребность и высокий спрос на специалистов в области цифровых и смежных технологий их подготовка практически не увеличивается или растет незначительно.

[205] Составлено автором на основе: Индикаторы цифровой экономики : 2022 : статистический сборник / Г.И. Абдрахманова и др. — Москва : НИУ ВШЭ, 2023. — 332 с.; Индикаторы цифровой экономики : 2024 : статистический сборник / В.Л. Абашкин и др. — Москва : ИСИЭЗ ВШЭ, 2024. — 276 с.

Таблица 2.1.4. Численность и структура IT-специалистов по группам занятий[206]

| | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|
| Количество специалистов (тыс. чел.) | 1190,4 | 1299 | 1322,8 | 1387,2 |
| Разработчики и аналитики программного обеспечения и приложений (проценты) | 56,6 | 58,6 | 60,5 | 54,9 |
| Специалисты по базам данных и сетям | 26,2 | 25,6 | 25,0 | 29,6 |
| Специалисты-техники по эксплуатации ИКТ и поддержке пользователей ИКТ (проценты) | 7,9 | 6,1 | 5,5 | 7,9 |
| Руководители служб и подразделений в сфере ИКТ (проценты) | 5,4 | 4,9 | 4,4 | 2,5 |
| Графические и мультимедийные дизайнеры (проценты) | 2,3 | 2,8 | 2,7 | 3,2 |
| Специалисты по сбыту ИКТ (проценты) | 1,0 | 1,2 | 1,1 | 1,2 |
| Специалисты по обучению компьютерной грамотности (проценты) | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,7 |

Согласно статистическим данным, мы видим, что наблюдается некоторый рост численности специалистов в области IT-технологий, однако их структура по видам занятий остается практически постоянной.

Преградой для развития и внедрения технологий цифровых двойников является и субъективный фактор — стремление контролировать информацию в рамках одной компании, а также соображение о том, что утрата некоторой информации может привести к падению конкурентоспособности компании. Поскольку рынок цифровых двойников является новым и, как отмечалось ранее, характеризуется дефицитом профессиональных кадров, то предприятиям сложно найти эксперта, который разбирается в математическом моделировании, машинном обучении, ИИ, больших данных одновременно. Приходится идти на компромиссы, нанимать нескольких сторонних исполнителей и предоставлять им доступ к внутренней закрытой информации. Это, в свою очередь обостряет проблему информационной

[206] Индикаторы цифровой экономики : 2024 : статистический сборник / В.Л. Абашкин и др. — Москва : ИСИЭЗ ВШЭ, 2024. — 276 с.

безопасности и риск привязки к вендору, чего и опасаются собственники предприятий[207].

Фирмы-производители программного обеспечения и крупные компании, управляющие инфраструктурными объектами, оборонно-промышленные предприятия, организации здравоохранения и образования наиболее часто подвергаются фишинговым атакам. В топ-3 отраслей, которые наиболее часто атаковали с помощью социальной инженерии входят государственные учреждения (44%), оборонно-промышленные предприятия (19%) и организации в сфере науки и образования (14%)[208]. Число кибератак на российские компании только за 2023 г. увеличилась в 4 раза[209]. Статистика 2023 года от EdgeЦентра подчеркивает серьезность ситуации: кибератаки на средний бизнес возросли на 43%, на малый — на 38%, а крупные предприятия под угрозой в 19% случаев. Прогноз на 2024 год предвещает, что DDoS-атаки на российский бизнес могут увеличиться на 400% из-за нестабильной политической обстановки. Эти цифры явно указывают на уязвимость предприятий из-за недостаточной защиты данных[210]. Разработка и внедрение цифровых двойников требует уделить серьезное внимание проблеме информационной безопасности бизнеса не только со стороны самих предприятий, но и со стороны государства.

В 2023–2024 г. произошел отток зарубежных компаний с российского рынка информационных услуг, что привело к необходимости быстрого замещения как софта, так и железа в условиях ограниченного ассортимента как оборудования, так

---

[207] Цифровые двойники в промышленности: возможности, перспективы, риски [Электронный ресурс]. — URL: // https://umbrellait.ru/blog/czifrovye-dvojniki-v-promyshlennosti-vozmozhnosti-perspektivy-riski/ (дата обращения: 07.11.2025).

[208] Тренды фишинговых атак на организации в 2022–2023 гг. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/phishing-attacks-on-organizations-in-2022-2023/ (дата обращения: 01.11.2025).

[209] Число кибератак в России и в мире [Электронный ресурс] / TADVISER. — URL: https://clck.ru/3QF2eC (дата обращения: 19.09.2023).

[210] Как обеспечить кибербезопасность своего бизнеса в 2024 году [Электронный ресурс]. — URL: https://companies.rbc.ru/news/wUFvbgOC3l/kak-obespechit-kiberbezopasnost-svoego-biznesa-v-2024-godu/ (дата обращения: 03.11.2025).

и программного обеспечения. Естественно, это привело к снижению защитных барьеров и усилению фишинговых атак. Атаки на бизнес стали сложнее, персонализированнее, потери стали нести крупные компании. С 2023-м атаки стали более частыми, изощренными и целенаправленными — от DDoS до целевых атак на инфраструктурные и периметровые объекты. Не прекращаются атаки на предприятия энергетики, транспорта и других отраслей реального сектора экономики. Злоумышленники пытаются дестабилизировать работу объектов критической инфраструктуры. Как отмечает Евгений Крайнов, генеральный директор «Телеком биржи», на российский рынок продуктов информационной безопасности влияют три фактора: дефицит экспертов, слабая координация между ИБ-компаниями, необходимость доработки российских продуктов под нужды клиентов.[211]

Правительство вынуждено оперативно реагировать на ситуацию принятием ряда нормативных актов, регулирующих сферу ИБ. Так, Указом Президента № 250 2022 г. была изменена сама парадигма обеспечения информационной безопасности —подход к ИБ должен быть системным, с учетом рисков и KPI мер защиты. Как ожидают аналитики большое влияние на рынок окажет закон о доверенных программно-аппаратных комплексах (Постановление Правительства РФ № 1912 от 14.11.2023). В нем говорится, что все ИБ-решения должны пройти обязательную сертификацию. К 2030 году организации КИИ обязаны полностью перейти на российское оборудование и ПО[212].

Рынок цифровых двойников (ЦД), имеющий возраст около десяти лет, характеризуется высокой динамикой роста, что затрудняет его сегментацию и

---

[211] Шитов А. Мир машинного разума: погубит ли нас искусственный интеллект? / А. Шитов // ТАСС. — 20 ноября 2023. — URL: https://tass.ru/opinions/19328319 (дата обращения: 07.11.2025).

[212] Информационная безопасность в 2024 году: от «галочки» к осознанности [Электронный ресурс]. — URL: https://www.novostiitkanala.ru/news/detail.php?ID=175120 (дата обращения: 16.02.2025).

точную оценку объёмов[213]. По экспертным оценкам, среднегодовой темп прироста рынка составляет около 60%[214]. Например, аналитическое агентство MarketsandMarkets прогнозирует рост мирового объёма с $11,8 млрд в 2023 г. до $155,83 млрд к 2030 г. при среднегодовом темпе 37,5%[215]. При этом прогноз 2022 г. был значительно более сдержанным (12,1%), что свидетельствует о резком ускорении интереса к технологии в последние годы.

Важным институциональным шагом стало утверждение в сентябре 2021 г. Росстандартом первого в мире национального стандарта «Цифровые двойники. Общие технические требования». Этот документ не только задаёт единые подходы к разработке и применению ЦД, но и формирует нормативную основу для реализации госпрограммы «Цифровая экономика», включая ускорение модернизации производств и повышение качества продукции.

В России развитие рынка ЦД активно поддерживается в рамках дорожной карты Национальной технологической инициативы «ТЕХНЕТ»: к 2024 г. ожидается, что цифровое моделирование будет внедрено не менее чем на 250 предприятиях с совокупными инвестициями в 145 млрд руб. — против 15 компаний в 2021 г.[216]. Такой рост особенно значим в условиях геополитических ограничений, когда технологический суверенитет и опережающая модернизация промышленных активов приобретают стратегическое значение[217].

Сфера применения цифровых двойников в России сосредоточена в машиностроении, энергетике, аэрокосмической промышленности и цифровой трансформации государственной инфраструктуры. На рынке присутствуют как

---

[213] Digital Twin Market Size, Share, Industry Report, Revenue Trends and Growth Drivers 2025–2030 [Электронный ресурс] // Marketsandmarkets. — URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html (дата обращения: 07.11.2025).

[214] Там же

[215] Там же

[216] План мероприятий («дорожная карта») «ТЕХНЕТ» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы [Электронный ресурс]. — URL: https://nti2035.ru/documents/docs/ДК%20Технет.pdf (дата обращения: 07.11.2025)

[217] Топ-10 трендов цифровизации [Электронный ресурс] // Ростелеком Бизнес. — URL: https://rostelecom.vedomosti.ru/top-trends.html (дата обращения: 07.11.2025).

отечественные (НИК «Научно-инженерный центр композитов», «СКБ Контур», «Ростелеком»), так и зарубежные вендоры (PTC, Siemens), хотя после 2022 г. доступ к последним существенно ограничен. Тем не менее, по оценкам экспертов, российский рынок пока не достиг критической массы, необходимой для устойчивого развития конкурентной среды[218].

Особую роль в стимулировании спроса играет нефтегазовый сектор. Применение цифровых двойников скважин и месторождений позволяет сократить капитальные затраты до 20%, повысить энергоэффективность и оптимизировать логистику. Так, в проекте «Цифровое месторождение» ПАО «Роснефть» в Башкирии реализован комплексный подход: все производственные объекты — от механизированного фонда скважин до систем подготовки нефти и энергетики — переведены в цифровой режим[219]. Ядром системы выступают цифровые двойники, дополняемые 3D-визуализацией, мобильными IoT-устройствами (умные каски, датчики местоположения и газового состава), а также специализированными модулями мониторинга трубопроводов, подготовки нефти, заводнения и энергопотребления[220]. В результате ожидается увеличение доли дистанционно управляемых объектов на 60%, рост энергоэффективности и снижение логистических издержек на 5%, а совокупная экономия — около 1 млрд руб. ежегодно.

Важно подчеркнуть, что рост рынка обусловлен не только экономическими выгодами, но и системными факторами. Во-первых, технология ЦД представляет собой конвергенцию решений Индустрии 4.0 — IIoT, облачных вычислений, машинного обучения и киберфизических систем, что обеспечивает двусторонний обмен данными между физическим и виртуальным объектами. Во-вторых, цифровые двойники позволяют достигать тройного эффекта: технологического

---

[218] Синицын С. Н. Необходимость создания цифровых двойников в России / С. Н. Синицын // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2024. — Т. 1, № 3 (144). — С. 77–84.

[219] «Роснефть» запустила проект «Цифровое месторождение» в Башкирии [Электронный ресурс] // Роснефть. — 19 мая 2019. — URL: https://www.rosneft.ru/press/news/item/195043/ (дата обращения: 21.05.2025).

[220] Корпоративный научно-проектный комплекс [Электронный ресурс]. — URL: https://limited.rosneft.ru/Development/knpk/ (дата обращения: 07.11.2025)

(ускорение вывода продукции), социального (улучшение условий и безопасности труда) и экологического (снижение углеродного следа), что соответствует глобальным повесткам устойчивого развития. В-третьих, на российском рынке наблюдается устойчивый переход от разрозненных, «точечных» решений к целостным платформенным ЦД, что повышает эффективность, но одновременно усиливает зависимость от одного поставщика и требует высокой степени интеграции корпоративных систем. Наконец, ключевым драйвером остаётся государственный заказ: в отличие от мировой практики, где спрос формируется частным бизнесом, в России инициатива исходит преимущественно от госкорпораций, а частный сектор пока проявляет ограниченный интерес.

## 2.2. Состояние зарубежного рынка цифровых двойников в современных условиях

По итогам 2023 года объём глобального рынка цифровых двойников достиг 12,81 млрд долл. США, что подтверждает устойчивую траекторию технологического и инвестиционного интереса к данному направлению[221]. Согласно прогнозу аналитической группы Verified Market Research, опубликованному 29 марта 2024 г., в период до 2030 г. рынок будет демонстрировать среднегодовой темп роста (CAGR) на уровне 39,8 %, а к концу прогнозируемого периода совокупные затраты могут достичь 274,2 млрд долл. США. При этом региональным лидером остаётся Северная Америка — в первую очередь благодаря высокой зрелости цифровой инфраструктуры, активной государственной поддержке программ цифровой трансформации и концентрации ключевых технологических игроков[222].

Альтернативная оценка, представленная консалтинговой группой Kings Research, указывает на ещё более высокий потенциал роста: объём рынка,

---

[221] Cloud Computing Research [Электронный ресурс] // Verified Market Research. — URL: https://www.verifiedmarketresearch.com/rcategory/cloud-computing-internet-communication-technology/ (дата обращения: 07.11.2025)

[222] Там же

составивший в 2023 г. 15,23 млрд долл., по прогнозам увеличится до 238,88 млрд долл. к 2031 г. при CAGR 41,70 %[223]. Такая динамика объясняется не только расширением применения цифровых двойников в традиционных секторах — промышленности и энергетике, — но и проникновением технологии в новые области: городское планирование («умные города»), здравоохранение (персонализированные цифровые двойники пациентов), сельское хозяйство (мониторинг агроэкосистем) и даже финансовую индустрию (цифровое моделирование рисков и процессов). Именно межотраслевая универсальность концепции обеспечивает высокую скорость диффузии.

Рост рынка обусловлен совокупным действием нескольких системных факторов, среди которых ключевую роль играют конвергенция технологий Индустрии 4.0, сдвиг в парадигме технического обслуживания и формирование новых кооперационных моделей между поставщиками решений.

Во-первых, распространение интернета вещей (IoT) и развитие облачных вычислений создают техническую основу для масштабного внедрения цифровых двойников. Современные предприятия генерируют колоссальные массивы данных в реальном времени — от датчиков давления и вибрации на насосных агрегатах до GPS-трекеров подвижного состава и систем видеонаблюдения. Однако сама по себе «цифровая пыль» не представляет ценности без инструментов её интерпретации. Цифровой двойник выступает именно таким инструментом: он интегрирует разнородные потоки данных в единую, семантически связанную модель, где каждый параметр имеет физический смысл и функциональную связь с другими элементами системы. Благодаря облачным платформам обеспечивается масштабируемость, доступность и возможность совместной работы над моделью — как в локальном масштабе (цех, предприятие), так и в глобальном (корпоративный уровень, межстрановое управление активами). Ярким примером такой интеграции стала инициатива Hexagon в июне 2023 г.: объединение платформ захвата реальности (HxDR) и производственной Nexus с экосистемой

[223] Рынок цифровых двойников [Электронный ресурс] // Kings Research. — URL: https://www.kingsresearch.com/ru/digital-twin-market-1196 (дата обращения: 07.11.2025).

NVIDIA Omniverse. Эта связка, усиленная возможностями ИИ, позволяет создавать фотореалистичные, физически корректные виртуальные копии сложных объектов — от отдельных узлов до целых цифровых фабрик — и проводить на них многовариантное моделирование, включая экстремальные сценарии (пожар, разгерметизация, отказ систем).

Во-вторых, цифровые двойники становятся ядром перехода от реактивного и планового к предиктивному (и даже прескриптивному) обслуживанию оборудования. Традиционные стратегии, такие как устранение неисправностей по факту отказа (техническое обслуживание по событию) или профилактика по жёсткому регламенту (планово-предупредительный ремонт), всё чаще демонстрируют неэффективность: первая — из-за высоких издержек аварийных простоев, вторая — из-за избыточных затрат на ненужное вмешательство. В отличие от них, обслуживание по фактическому состоянию (ОФС), основанное на непрерывном мониторинге и аналитике, позволяет выявлять скрытые деградационные процессы (например, постепенный износ подшипников, коррозию трубопроводов, дрейф калибровок) и планировать вмешательство до наступления отказа. По данным Министерства энергетики США, внедрение ОФС способно сократить расходы на техническое обслуживание на 25 %, число аварий — на 70 %, незапланированные простои — на 35 %, при этом повысив производительность на 20 %. Цифровой двойник в данном контексте выполняет роль «живой» цифровой лаборатории, где с помощью алгоритмов машинного обучения и физико-математического моделирования формируются надёжные прогнозы оставшегося ресурса и оптимальных режимах эксплуатации.

В-третьих, ускорение коммерциализации технологии обусловлено активизацией стратегических партнёрств и M&A-сделок между технологическими гигантами, ИТ-консультантами и отраслевыми специалистами. Компании осознают, что создание полноценного, «целостного» цифрового двойника требует не только программных компонентов, но и глубокого понимания бизнес-процессов, нормативных требований, специфики инженерных систем. Поэтому наблюдается устойчивый тренд на формирование альянсов: ведущие облачные

провайдеры (Microsoft, Google, AWS, NVIDIA) развивают специализированные сервисы — Microsoft Digital Twins Ontology для Smart Buildings, Google Cloud Digital Twin, AWS IoT TwinMaker и FleetWise для промышленности и автопрома, NVIDIA Omniverse Enterprise как платформа метавселенной для инженеров. Эти решения снижают порог входа и ускоряют развёртывание проектов. Показательна сделка Accenture, приобретшей в январе 2025 г. сингапурскую финтех-компанию Percipient, специализирующуюся на цифровых двойниках для банковского сектора. Интеграция этой платформы в портфель Accenture даёт заказчикам доступ к готовому решению для модернизации ядерных банковских систем — от моделирования клиентских потоков до стресс-тестирования операционных рисков, что особенно востребовано в Азиатско-Тихоокеанском регионе[224]. Подобные шаги свидетельствуют о том, что рынок выходит за рамки «технологического хобби» и превращается в инфраструктурный компонент цифровой трансформации.

Таким образом, рост рынка цифровых двойников — это не просто результат маркетинговой активности или единичных пилотных проектов, а следствие глубокой технологической и организационной эволюции промышленности и смежных отраслей. Формируется новая парадигма, в которой цифровая модель перестаёт быть вспомогательным инструментом и становится центральным элементом принятия решений — «единым источником истины» для всего жизненного цикла актива.

Растет количество беспроводной связи с использованием Интернета вещей.

[224] Там же

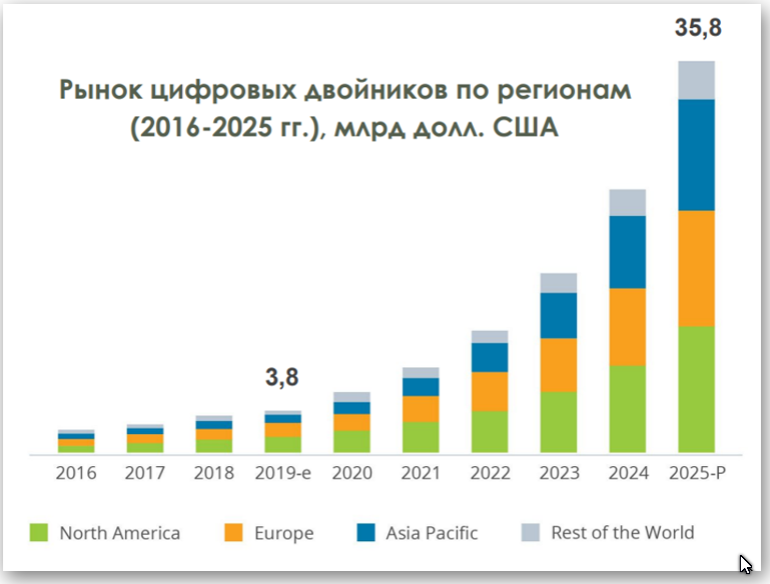



Рисунок 2.2.1. Обзор рынка цифровых двойников[225]




Рисунок 2.2.2. Рынок цифровых двойников: темпы проста по регионам[226].

Основную долю рынка цифровых двойников в 2023 году занимала Северная Америка. Согласно отчету компании Kingsresearch, ее доля на рынке оценивалась в 5,22 млрд долл. США, что составляло 34,26% мирового рынка. Такое доминирование США, как считают аналитики, связано с развитой

[225] Современные модели оценки и прогнозирования конкурентоспособности при разработке цифровых двойников сложных объектов [Электронный ресурс] / А.Ю. Подчуфаров и др. — URL: https://www.hse.ru/data/2021/12/25/1763508536/Doklad_k_17_12.pdf (дата обращения: 07.11.2025).

[226] Там же.

инфраструктурой здравоохранения, которая способствует внедрению цифровых технологий.

Внедрение цифровых двойников выходит за рамки традиционных промышленных секторов и активно проникает в высокотехнологичные области, такие как здравоохранение, где технология становится ключевым элементом персонализированной и прецизионной медицины. Ведущие клиники Северной Америки — в частности, клиника Мэйо и клиника Кливленда — уже используют цифровые двойники для моделирования индивидуальных патофизиологических процессов, планирования виртуальных операций, а также для предиктивного контроля состояния медицинского оборудования. Эти решения позволяют не только повысить точность хирургических вмешательств и снизить послеоперационные риски, но и оптимизировать эксплуатационные циклы высокозатратных диагностических и терапевтических систем (МРТ, линейные ускорители и др.), что особенно актуально в условиях растущих нагрузок на медицинскую инфраструктуру.

Ярким примером такой трансформации стало партнёрство клиники Мэйо с технологической компанией SimBioSys в январе 2024 года. Цель сотрудничества — разработка облачной программной платформы на базе искусственного интеллекта, способной конструировать индивидуальные цифровые двойники опухолей молочной железы. Такая модель учитывает не только анатомо-морфологические особенности новообразования (размер, локализация, васкуляризация), но и молекулярно-генетические маркеры, фармакокинетику препаратов и реакцию ткани на лучевую терапию. В результате клиницисты получают возможность предварительно протестировать различные сценарии лечения (хирургия, химиотерапия, таргетная терапия) и выбрать наиболее эффективный и безопасный вариант для конкретного пациента — ещё до начала реального вмешательства. Подобный подход кардинально меняет парадигму онкологической помощи: переход от стандартизированных протоколов к динамически адаптируемым, пациент-ориентированным стратегиям управления заболеванием.

Эволюция рынка обусловлена не только ростом спроса, но и активной стратегической консолидацией ключевых игроков. В условиях высокой междисциплинарной сложности решений компании стремятся формировать экосистемы компетенций через партнёрства, совместные центры компетенций и приобретения специализированных стартапов. Так, в июне 2023 года финская компания Mevea, специализирующаяся на высокоточных симуляторах, поставила цифровые двойники и программные модули для интеграции в открытую платформу дистанционного управления кранами SIMOCRANE от Siemens. Это решение позволяет не только автоматизировать работу сложных портовых и складских комплексов, но и проводить виртуальные испытания новых режимов управления, отладку ПО и обучение операторов в безопасной, контролируемой среде — без риска для реального оборудования и персонала.

Ещё один показательный пример — меморандум о взаимопонимании между ANSYS Inc. и индийской LT Technology Services Limited (LTTS), подписанный в марте 2023 года. Стороны создали Центр передового опыта (CoE) по цифровым двойникам, в рамках которого LTTS получает доступ к Ansys Twin Builder — инструменту для создания физически корректных, многодоменных моделей, сочетающих механические, тепловые, электромагнитные и гидродинамические аспекты. Это сотрудничество демонстрирует переход от поставки «коробочных» решений к формированию vertically integrated value chains (вертикально интегрированных цепочек создания ценности): от разработки цифровой модели — через её валидацию в виртуальной среде — к внедрению в реальные производственные и сервисные процессы.

Наиболее впечатляющие темпы роста демонстрирует Азиатско-Тихоокеанский регион, где среднегодовой темп прироста рынка оценивается в 44,01 % на прогнозируемый период. Драйверами выступают масштабные государственные инициативы, направленные на модернизацию промышленности и городской инфраструктуры. В Китае, например, уже оцифровано около 10 тыс.

цехов с интеллектуальным производством[227], а число пилотных «образцово-показательных» фабрик достигло 421, причём 90 % из них используют технологии ИИ и цифровых двойников[228]. При этом национальная система инноваций обеспечивает технологическую автономию: количество действующих патентов на изобретения в области ИИ к концу 2023 года превысило 378 тыс., а в 2024 году этот показатель вырос более чем на 40 %[229], что создаёт устойчивую базу для локальной разработки решений.

Особое внимание уделяется цифровым двойникам «умных городов». Проект Virtual Singapore — один из наиболее зрелых в мире — представляет собой трёхмерную геопространственную модель, интегрирующую данные о зданиях, транспортных потоках, микроклимате, энергопотреблении и даже поведении граждан. Эта платформа используется не только для долгосрочного градостроительного планирования (оценка плотности застройки, теневой нагрузки, вентиляции), но и для оперативного управления: моделирования эвакуации при чрезвычайных ситуациях, оптимизации маршрутов общественного транспорта, оценки устойчивости инфраструктуры к экстремальным погодным явлениям[230].

В Индии инициатива «Сангам: цифровой двойник», объявленная в феврале 2024 года Департаментом телекоммуникаций, призвана унифицировать подходы к проектированию и эксплуатации инфраструктурных объектов по всей стране. Пилотным проектом стал город Амаравати — новая столица штата Андхра-Прадеш, спроектированная «с нуля» в цифровом формате. Здесь цифровой двойник позволяет отслеживать прогресс строительства в реальном времени, проводить имитации поведения зданий в условиях тропического климата (влажность, УФ-нагрузка, циклические температурные колебания), моделировать загрузку

---

[227] Китай насчитал у себя 10 тыс. цифровых двойников предприятий [Электронный ресурс] // Pro Shering. — 2024. — URL: https://sharingpro.ru/kitaj-naschital-u-sebja-10-tys-cifrovyh-dvojnikov-predprijatij/

[228] Там же

[229] ИТ-рынок Китая [Электронный ресурс]. — URL: https://clck.ru/3QF5yF

[230] Грищенко Л.Л. Применение технологий «цифрового двойника» города для обеспечения безопасности его жителей [Электронный ресурс] / Л.Л. Грищенко, Ю.Л. Корабельникова // Baikal Research Journal. – 2022. — Т. 13, № 4. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologiy-tsifrovogo-dvoynika-goroda-dlya-obespecheniya-bezopasnosti-ego-zhiteley/viewer

инженерных сетей и даже оценивать социальные эффекты (доступность школ, медицинских учреждений). Такой подход минимизирует проектные ошибки и позволяет вносить корректировки до физического воплощения, что критически важно для крупномасштабных инфраструктурных инициатив.

Тем не менее, технологический энтузиазм не всегда находит отклик у конечных пользователей. В Японии, несмотря на высокий уровень цифровизации промышленности и госсектора, 40,4 % респондентов в опросе января — февраля 2024 года заявили, что не используют цифровые двойники, поскольку «они не нужны в повседневной жизни» — причём этот ответ преобладал даже над неосведомлённостью о технологии[231]. Это указывает на важную методологическую проблему: разрыв между технологической зрелостью и социально-экономической востребованностью. Простое наличие инструмента не гарантирует его эффективного применения — требуется тщательная адаптация под контекст, формирование новых компетенций и, что особенно важно, демонстрация измеримых выгод для конкретного пользователя.

В перспективе, по оценкам аналитиков, рынок АТР к 2037 году станет вторым по величине в мире, удерживая около 26 % глобальной доли. Ключевым фактором роста выступает способность цифровых двойников обеспечивать устойчивое планирование и эксплуатацию инфраструктуры — от снижения жизненного цикла затрат на промышленные активы до повышения резистентности городских систем к климатическим и техногенным вызовам[232].

Европейский рынок, в свою очередь, развивается под влиянием тройного императива: Industry 4.0, «умные города» и цифровой суверенитет. Акцент на экологическую устойчивость, энергоэффективность и прозрачность управления делает цифровые двойники не просто инструментом оптимизации, а компонентом регуляторного соответствия — например, при расчёте углеродного следа зданий

---

[231] Digital twin — statistics & facts [Электронный ресурс] // Statista. — URL: https://www.statista.com/topics/9847/digital-twin/?srsltid=AfmBOoq-dZ0FgpHTbWGdXUBv3QuqITmJsiNVfaywXkESghND-mrYz39I

[232] Перспективы рынка цифровых двойников [Электронный ресурс]. — URL: https://www.researchnester.com/ru/reports/digital-twin-market/4226#market-trends

(Energy Performance Certificates) или жизненного цикла продукции (Digital Product Passports в рамках Европейского Зелёного Курса). Прогнозируется, что к 2037 году европейский сегмент займёт значительную долю глобального рынка, в том числе благодаря поддержке со стороны Европейской комиссии и национальных программ трансформации[233].

Таким образом, рынок цифровых двойников вступает в фазу масштабной институционализации: технология переходит от отдельных пилотных проектов к системным решениям, встроенным в стратегические программы государств и корпораций. Однако её устойчивое развитие будет зависеть не только от технических прорывов, но и от способности интегрировать цифровые модели в живые бизнес-процессы, корпоративные культуры и регуляторные рамки — с чётким фокусом на создание социально и экономически измеримой ценности по отраслевым вертикалям (производство, здравоохранение, автомобилестроение, аэрокосмическая и оборонная промышленность, энергетика и коммунальные услуги, розничная торговля, транспорт и логистика, строительство и эксплуатация, управление, сельское хозяйство и другие.), по отраслям конечного использования (производители оригинального оборудования (OEM), поставщики услуг технического обслуживания, ремонта и эксплуатации (MRO), умные города и градостроители, исследовательские и академические институты, правительство и оборона, и другие), по географии — глобальный анализ возможностей[234].

Интересен опыт стран Персидского залива. Практически все страны региона взяли курс на диверсификацию экономики в том числе за счет приоритетного развития цифровых технологий. Для стран региона характерно большое участие государства в инициативах по достижению лидерства в области IT и цифровизации. Несмотря на то, что эти страны относительно недавно приняли соответствующие стратегии, результаты уже видны. Так, по уровню проникновения интернета пять

---

[233] Там же

[234] Объем рынка цифровых близнецов к 2030 году составит $16,7 млрд: IndustryARC [Электронный ресурс] // iCrowdNewswire. — URL: https://clck.ru/3QF7GS (дата обращения: 07.11.2025).

стран Персидского залива (из шести, исключение — Оман) занимают первые 5 мест в мировом рейтинге; в Саудовской Аравии, Катаре, Бахрейне, ОАЭ и Кувейте интернетом пользуются 100% населения. Совокупные инвестиции в информационные и коммуникационные технологии (ИКТ) в странах Персидского залива достигли значительного уровня, составив 73,3 миллиарда долларов США в 2023 году.[235] Наблюдаемая динамика расходов свидетельствует о переходе от ресурсной экономики к экономике, основанной на знаниях и цифровых решениях. Ключевую роль в формировании регионального технологического ландшафта играют Саудовская Аравия и Объединенные Арабские Эмираты (ОАЭ), на совокупную долю которых приходится порядка 74% всех технологических расходов в регионе. Это указывает на высокую степень концентрации капитала и стратегических инициатив в двух наиболее экономически мощных государствах, выступающих в роли основных драйверов роста.

В структуре технологического рынка сегмент IT-услуг занимает приблизительно 10%, причем наибольший удельный вес в его рамках принадлежит услугам IT-аутсорсинга. Данный рынок характеризуется исследователями как достигший высокой стадии зрелости, что подразумевает устоявшиеся модели спроса и предложения. Согласно прогнозам аналитического агентства Statista, среднегодовые темпы роста этого сегмента в течение последующих 5–6 лет сохранятся на уровне около 8%, демонстрируя устойчивый, хотя и не экспоненциальный, прогресс.

Рынок программного обеспечения в государствах Залива оценивается в 4 миллиарда долларов по итогам 2023 года. Более 40% этой суммы приходится на корпоративное программное обеспечение, включающее системы планирования ресурсов предприятия (ERP), управления взаимоотношениями с клиентами (CRM) и бизнес-аналитики (BI). Ожидается, что в ближайшую пятилетку рост данного рынка будет умеренным, колеблясь в диапазоне от 3 до 5% в год, что отражает этап его консолидации и углубленной специализации.

---

[235] Страны Персидского залива и будущее IT [Электронный ресурс] // Forbes. — URL: https://blogs.forbes.ru/2023/10/17/strany-persidskogo-zaliva-i-budushhee-it/

Цифровая трансформация и развитие IT-сектора в последние годы стали центральными элементами государственной политики всех стран региона. Это нашло отражение в принятии национальных программ, нацеленных на стимулирование цифровых технологий и искусственного интеллекта (ИИ). В качестве показательных примеров можно привести ОАЭ. В этой стране утверждены и действуют государственные стратегии развития отдельных сегментов, в частности, искусственного интеллекта и блокчейн-технологий. Также с целью привлечения международных IT-компаний в Дубай власти ОАЭ запустили проект по созданию крупного центра технологических инноваций Dubai Internet City. Катар инициировал создание масштабного инновационного кластера TASMU Digital Valley, а Бахрейн принял Стратегию цифрового правительства (Digital Government Strategy 2022), направленную на модернизацию государственного управления. Отдельного внимания заслуживают мегапроекты, реализуемые Саудовской Аравией. Самыми амбициозными можно назвать проект Неом, предполагающий строительство «городов будущего», в частности города, где все коммуникации и магистрали проложены под землей, инновационного порта на воде и премиального горного туристического кластера.

Ускоренная цифровизация экономик региона обусловила острую необходимость в опережающем развитии критической инфраструктуры, особенно в сфере хранения и обработки данных. Долгое время локальные компании были вынуждены полагаться на зарубежные дата-центры. Ситуация начала меняться с 2019 года. Тогда в Бахрейне был создан первый региональный дата-центр Amazon Web Services. Позже, в 2022 году, аналогичный центр был создан и в ОАЭ. С этого момента можно говорить об опережающем росте дата-центров в регионе. К их созданию подключились крупнейшие мировые компании. Отличительной особенностью этого процесса является то, что в нем участвуют, как IT, так и промышленные компании. Например, на сегодняшний день действует партнерское соглашение о развитии облачных сервисов между саудовской нефтяной корпорацией Saudi Aramco и Google. Еще один известный пример – открытие телекоммуникационной компанией STC совместно с Alibaba двух совместных

дата-центров. Согласно прогнозам, рынок облачных услуг в странах Персидского залива к 2027 году превысит 18 миллиардов долларов, что означает его более чем двукратный рост за пятилетний период.[236]

Можно говорить о том, что в регионе активное внедрение технологий, позволяющих осуществлять сбор и анализ данных в режиме реального времени, стало инструментом реализации более масштабной стратегии по диверсификации промышленности и сферы услуг. Согласно этой логике, в регионе активно развивается цифровизация государственных услуг. Лидерами в этом направлении являются Бахрейн и Саудовская Аравия. Например, в Бахрейне принята Национальная стратегия цифровой трансформации страны, которая предполагает консолидацию государственных данных для их использования в прогнозной аналитике и при принятии решений. В Саудовской Аравии системы управления данными внедрены в работу более 130 правительственных органов. Самым успешным проектом считается приложение Dubai Now, обработавшее с момента запуска 20 миллионов транзакций на сумму 2,7 миллиарда долларов.[237] Аналогичные платформы внедрены и в других странах, например, Tawakkalna Services в Саудовской Аравии, Sahel в Кувейте и Hukoomi в Катаре.

Алгоритмы ИИ и другие технологии, в том числе цифровые двойники активно используются для развития и модернизации транспортной сферы. В качестве примера следует упомянуть интеллектуальный центр управления ЕС3, созданный в Дубае, который на основе данных тысяч камер наблюдения осуществляет мониторинг и контроль сети дорог и работы такси.

Однако более известны примеры использования цифровых решений для развития туристического комплекса. В качестве примера успешного внедрения новых технологий в этой сфере часто приводят опыт Катара по созданию цифровых двойников, когда в 2022 году для управления потоками болельщиков во время чемпионата мира по футболу было задействовано примерно 40 тысяч IoT-устройств. Уже объявлено, что технологии IoT будут использованы при подготовке

---

[236] Страны Персидского залива и будущее IT [Электронный ресурс] // Forbes. — URL: https://blogs.forbes.ru/2023/10/17/strany-persidskogo-zaliva-i-budushhee-it/ (дата обращения: 07.11.2025).
[237] Там же

и проведении зимних Азиатских игр 2029 года в рамках упомянутого выше проекта Неом.

Особых успехов удалось достичь в сфере развития искусственного интеллекта. На эти цели государства региона, особенно ОАЭ, Саудовская Аравия, Оман и Катар выделяют значительные суммы, превосходя по этому показателю европейские страны. Так, в Саудовской Аравии осуществляется масштабная программа диверсификации экономики к 2030 году, Vision 2030, в том числе и за счет развития новых информационных и цифровых технологий. В контексте данного исследования интересен опыт создания в ее рамках фонда Softbank Vision Fund на общую сумму более 135 миллиардов долларов. При выполнении всех заявленных в Стратегии целей к 2030 году Саудовская Аравия войдет в топ-15 мировых лидеров в области ИИ. Аналогичная стратегия реализуется в Омане, принявшем национальную программу Vision 2040. В документе развитие искусственного интеллекта заявлено инструментом создания новых высокотехнологичных рабочих мест, развития профессиональных навыков и повышения производительности труда. Другие страны также системно подходят к развитию цифрового сектора. Например, в ОАЭ впервые в мире создали министерство искусственного интеллекта.

Однако развитие IT-сектора сталкивается и с рядом системных вызовов. Наиболее существенным из них является кадровый вопрос. Экономический рост и реализация инфраструктурных проектов во многих странах региона по-прежнему в значительной степени зависят от постоянного притока высококвалифицированных иностранных специалистов (экспатов). В этой связи критически важным становится не только создание передовой технологической инфраструктуры, но и формирование привлекательной комплексной среды для жизни и работы. Ее ключевыми элементами выступают гарантии политической и социальной стабильности, высокий уровень личной безопасности, развитая городская среда, качественные системы здравоохранения и образования. Таким образом, конкурентоспособность региона на глобальном рынке талантов

становится одним из определяющих факторов для успеха всей цифровой трансформации[238].

В Африке цифровые двойники используются при моделировании растений и сельскохозяйственных животных. Первые упоминания в экономических журналах об этом факте относятся к 2017 г.[239]




Рисунок 2.2.3. Характеристики цифровых двойников, полезных в сельском хозяйстве[240]

В Латинской Америке лидерами роста цифровых технологий являются Бразилия, Чили и Мексика. По данным РБК, ожидается, что рынок услуг в области информационных технологий в регионе LATAM вырастет на $48,44 млрд при среднегодовом темпе роста 8,09% до 2028 года. При этом выручка на рынке IT-услуг увеличится до $56,53 млрд в 2024 году и достигнет $74,49 млрд в 2029-м[241].

---

[238] Страны Персидского залива и будущее IT [Электронный ресурс] // Forbes. — URL: https://blogs.forbes.ru/2023/10/17/strany-persidskogo-zaliva-i-budushhee-it/

[239] Pylianidis C. Introducing digital twins to agriculture / C. Pylianidis, S. Osinga, I.N. Athanasiadis // Computers and Electronics in Agriculture. — 2021. — Vol. 184. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920331471?via%3Dihub (дата обращения: 07.11.2025).

[240] Там же.

[241] Как развивается IT-рынок Латинской Америки и какие у него перспективы [Электронный ресурс] // РБК. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/66d045e29a7947553a8f9986?from=copy (дата обращения: 07.11.2025).

По данным аналитиков Statista, рынок IT-услуг в странах Латинской Америки в настоящее время переживает значительный рост, который обусловлен такими факторами, как:

– общий рост интереса мировых компаний к аутсорсингу;

– рост спроса на региональные облачные сервисы, включая инфраструктуру как услугу (IaaS), платформу как услугу (PaaS) и программное обеспечение как услугу (SaaS), а также услуги обеспечения кибербезопасности;

– интерес к местным специалистам за счет наличия сильного кадрового резерва. Только в Мексике и Бразилии университеты выпускают в общей сложности более 600 тыс. разработчиков программного обеспечения каждый год;

– распространение английского языка. В Индексе EF, который оценивает уровень владения английским языком среди 2,2 млн взрослых в 113 странах и регионах, Латинская Америка находится на втором месте по этому показателю после Европы[242].

В настоящее время одной из основных тенденцией, формирующей глобальный рынок цифровых двойников, является растущая интеграция технологий искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения (ML). Поскольку организации стремятся извлечь больше пользы из своих цифровых двойников, искусственный интеллект и ОД используются для расширения возможностей прогнозирования, оптимизации процесса принятия решений и автоматизации сложных процессов. Синергия между цифровыми двойниками и AI / ML позволяет разрабатывать интеллектуальные системы, которые могут обучаться и адаптироваться на основе данных в режиме реального времени.

Искусственный интеллект и ML выводят прогнозную аналитику на передний план цифровых двойников, позволяя компаниям предвидеть потенциальные проблемы, моделировать различные сценарии и оптимизировать производительность. Например, в производстве интеллектуальное техническое обслуживание с использованием искусственного интеллекта может анализировать

[242] Там же.

исторические данные и входные данные датчиков в режиме реального времени, чтобы предсказать, когда оборудование, вероятно, выйдет из строя, обеспечивая упреждающее техническое обслуживание для предотвращения дорогостоящих простоев. В городском планировании цифровые двойники с использованием искусственного интеллекта могут моделировать влияние различных изменений инфраструктуры и оптимизировать планировку городов для повышения эффективности и устойчивости.

Интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения в цифровые двойники также способствует постоянному совершенствованию. Системы могут извлекать уроки из текущих операций, адаптироваться к меняющимся условиям и оптимизировать свои модели с течением времени. Эта тенденция не только расширяет возможности цифровых двойников, но и прокладывает путь к более автономному и интеллектуальному принятию решений во всех отраслях, способствуя дальнейшему внедрению передовых цифровых копий на мировом рынке.

Новой тенденцией на мировом рынке цифровых двойников является широкое внедрение передовых вычислений, позволяющих в режиме реального времени обрабатывать и анализировать данные, генерируемые цифровыми двойниками. Традиционные модели облачных вычислений предполагают передачу данных с датчиков на централизованный облачный сервер для обработки и анализа. Однако по мере увеличения объема данных, генерируемых устройствами Интернета вещей и цифровыми двойниками, растет потребность в более быстрых и эффективных возможностях обработки.

Передовые вычисления приближают вычислительные мощности к источнику данных, сокращая задержки и позволяя принимать решения в режиме реального времени. В контексте цифровых двойников эта тенденция особенно актуальна для приложений, требующих мгновенного реагирования, таких как автономные транспортные средства, «умные города» и мониторинг критической инфраструктуры. Обрабатывая данные на периферии, организации могут добиться

снижения задержек, повышения надежности и снижения зависимости от непрерывного подключения с высокой пропускной способностью.

В производственных средах передовые вычисления позволяют анализировать данные датчиков оборудования в режиме реального времени, позволяя мгновенно вносить коррективы для оптимизации производственных процессов. В здравоохранении передовые вычисления расширяют возможности цифровых двойников в мониторинге и диагностике пациентов, предоставляя специалистам здравоохранения своевременную информацию.

Внедрение передовых вычислений в сочетании с цифровыми двойниками не только решает проблемы, связанные с задержкой передачи данных, но и поддерживает масштабируемость этих систем. Поскольку тенденция продолжает развиваться, передовые вычисления, вероятно, станут неотъемлемым компонентом цифровых двойных архитектур, способствуя созданию более гибкой цифровой экосистемы в различных отраслях[243].

Подводя итог, можно отметить, что цифровые двойники уверенно развиваются практически на всех континентах и во всех сферах человеческой деятельности существенно увеличивая производительность труда, надежность и безопасность создания и использования объектов недвижимости, прогресс в области медицины и других социальных отраслях, повышая в целом качество жизни людей.

На развитие цифровых двойников оказывают влияние такие факторы, как: уровень развития цифровой инфраструктуры; уровень развития искусственного интеллекта и интернета вещей; цифровые компетенции сотрудников предприятий и населения; воля правительств и поддержка (в том числе и финансовая) цифровых двойников.

Однако применение цифровых двойников влечет за собой целый ряд проблем, о которых пойдет речь в следующем разделе.

## 2.3. Ключевые вызовы рынка цифровых двойников

[243] Синицын С.Н. Цифровые двойники как инструмент формирования бизнес-среды современных организаций / С.Н. Синицын // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. — 2024. — Т. 20, № 9(438).

Одной из главных проблем, стоящих перед глобальным рынком цифровых двойников, является отсутствие взаимодействия и стандартизации в различных отраслях. Цифровые двойники часто предполагают интеграцию сложных систем, источников данных и технологий, а отсутствие стандартизированных протоколов и интерфейсов препятствует бесперебойной коммуникации и сотрудничеству. Поскольку разные отрасли внедряют цифровые двойники разными темпами и с разными наборами технологий, достижение функциональной совместимости становится серьезным препятствием. Возникает проблема эксплуатационной совместимости цифровых двойников.

Одним из ключевых барьеров широкомасштабного внедрения цифровых двойников остаётся отсутствие унифицированных стандартов — как на уровне технической совместимости, так и на уровне семантической и функциональной интероперабельности. В условиях, когда предприятия уже обладают гетерогенной ИТ-инфраструктурой, сформированной из решений разных вендоров (датчики, SCADA-системы, ERP-платформы, облачные сервисы), интеграция цифрового двойника в существующую экосистему превращается в многоуровневую инженерную задачу. Отсутствие единых протоколов обмена данными, несогласованность форматов метаданных и различия в архитектурных подходах к моделированию приводят к фрагментации цифровых моделей, их изоляции и невозможности формирования целостного цифрового образа объекта или процесса. Это, в свою очередь, не только сдерживает масштабируемость решений, но и нивелирует одно из главных преимуществ технологии — способность обеспечивать сквозную, контекстно-наполненную аналитику на уровне всей производственной или инфраструктурной системы.

Для преодоления этого барьера требуется системная координация заинтересованных сторон — от национальных регуляторов и международных стандартных организаций (ISO/IEC, IEC, IEEE) до корпоративных ассоциаций и ведущих технологических платформ. Необходимо выработать и внедрить согласованные требования в четырёх критических измерениях:

1. Межмодельная совместимость — механизмы, позволяющие разным цифровым двойникам (например, двойника скважины и двойника трубопровода) корректно обмениваться данными и формировать составные модели без потери семантического смысла;

2. Интерфейсная совместимость — стандарты API и обмена сообщениями, обеспечивающие взаимодействие прикладных программ (например, систем управления добычей или предиктивной аналитики) с цифровыми двойниками независимо от их поставщика;

3. Физико-цифровая синхронизация — протоколы, гарантирующие точное и своевременное отражение состояния физического объекта в его виртуальной копии, включая тайм-стемпинг, управление задержками и версионирование данных;

4. Источниковая интеграция — единые правила форматирования, калибровки и верификации данных, поступающих от датчиков, лабораторных анализов, внешних систем и человеко-машинных интерфейсов.

Однако даже при наличии технических стандартов перед отраслью встаёт фундаментальная проблема информационной безопасности, усугубляемая двойственной природой цифрового двойника: он одновременно является репрезентантом физического актива и управляющим агентом по отношению к нему. В отличие от классических информационных систем, где нарушение целостности или конфиденциальности приводит к информационному ущербу, в случае с цифровыми двойниками сбой или компрометация может иметь прямые физические последствия — от технологических аварий до экологических катастроф.

Как справедливо отмечает Елин В. М., традиционная триада информационной безопасности — конфиденциальность–целостность–доступность — оказывается недостаточной для оценки рисков, связанных с цифровыми

двойниками[244]. В частности, понятие целостности требует переосмысления: если физический объект динамически изменяется (например, изнашивается оборудование или меняется режим добычи), то статическая проверка «неизменности» цифровой модели теряет смысл. Вместо этого необходимо вводить критерий адекватности — способности виртуального образа достоверно отражать текущее и прогнозируемое состояние реального объекта с требуемой точностью и в заданных временных границах.

Угрозы, связанные с цифровыми двойниками, можно разделить на несколько уровней[245]:

- Уровень логики модели: умышленное или случайное искажение физико-математических законов, заложенных в модель (например, занижение коэффициента трения в трубопроводной системе), что приводит к ошибочным выводам при сценарном анализе и оптимизации;

- Уровень параметризации: манипуляция входными данными (например, подмена показаний давления или температуры), создающая ложную картину состояния объекта;

- Уровень оптимизационных алгоритмов: нарушение логики поиска решений — например, подбор заведомо неустойчивого режима работы насосной станции под видом «оптимального» с точки зрения затрат;

- Уровень визуализации: искажение 2D/3D-представления процессов, ведущее к ошибкам в принятии решений операторами и инженерами;

- Уровень исполнения: компрометация канала «цифровой двойник → физический объект», когда вредоносная команда, сгенерированная на основе ошибочной модели, передаётся в систему управления и реализуется в реальном мире.

Особую озабоченность вызывает тот факт, что многие цифровые двойники разрабатываются и размещаются на иностранной программно-аппаратной

---

[244] Елин В. М. Технология цифрового двойника. Понятие и особенности подхода к организационно-правовому обеспечению комплексной безопасности / В. М. Елин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Право». — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 68–75

[245] Там же

платформе. В условиях обострения технологической конкуренции и геополитической напряжённости это создаёт риски не только утечки коммерческой и технологической тайны, но и прямого дистанционного воздействия на критически важные объекты инфраструктуры — энергетики, транспорта, добывающей промышленности. Кибератака, направленная не на базу данных, а на логику принятия решений цифрового двойника, может остаться незамеченной длительное время, поскольку внешние признаки «нормальной работы» сохраняются, но оптимальность и безопасность постепенно деградируют.

В этих условиях обеспечение безопасности цифровых двойников требует перехода от реактивных мер (антивирусы, брандмауэры) к проактивной, модельно-ориентированной защите. Это включает:

- верификацию и валидацию моделей «вне цикла эксплуатации» с использованием независимых наборов данных;

- внедрение механизмов объяснимого ИИ (XAI), позволяющих человеку проследить причинно-следственные связи между входными параметрами и управленческими рекомендациями;

- применение технологий доверенной загрузки и контроля целостности ПО (Secure Boot, TPM, remote attestation);

- построение многоуровневой системы управления доступом, основанной не только на ролях, но и на контексте (время, местоположение, состояние объекта);

- внедрение блокчейн- или криптографических решений для аудита изменений в модели и фиксации происхождения данных.

Таким образом, развитие рынка цифровых двойников уже вышло за рамки чисто технологического вызова. Оно переходит в плоскость нормативно-правового и институционального проектирования, где успех будет зависеть не столько от вычислительной мощности или точности модели, сколько от способности обеспечить доверие — со стороны бизнеса, регуляторов и общества.

Следует отметить, что количество кибератак в мире растет быстрыми темпами и значительно увеличивается год от года. Так количество кибератак в мире в 1 квартале 2024 года увеличилось на 118%. Атаки стали гораздо сложнее, так как

используют искусственный интеллект, а инновации ускоряют разработку хакерского ПО.

Самым значительным атакам подвергался финансовый сектор — плюс 147%. География атак включает страны с высокой деловой активностью и мощной интернет-инфраструктурой. В состав пятерки лидеров в 2024 году входят такие страны, как США (12,8%), Индия (10,7%), Китай (10,7%), Великобритания (9,8%) и Австрия (9,3%)[246].

По-прежнему чаще всего на географию угроз влияют политические и экономические факторы. В частности, в третьем квартале 2024-го наблюдался всплеск атак на государственные сайты в Австрии. Политически мотивированные группировки пытались повлиять на ход парламентских выборов в этой стране. Кроме того, активность хакеров резко возросла во Франции, что могло быть реакцией на арест Павла Дурова. А военные конфликты в Израиле привлекли новую волну DDoS-атак в этой стране.

Что касается ОАЭ, Великобритании и Германии, то эти страны чаще страдали из-за собственной экономической значимости на общемировой арене. Многие DDoS-атаки на резидентов этих государств запускались исключительно ради получения финансовой выгоды.

[246] Разбираем тренды в мире DDoS-атак : отчет StormWall за третий квартал 2024 [Электронный ресурс] // StormWall. — URL: https://stormwall.pro/resources/blog/otchet-o-ddos-atakah-2024-tretij-kvartal (дата обращения: 07.11.2025).




Рисунок 2.3.1. Статистика DDoS-атак по странам мира[247]

На российские компании и организации госсектора количество кибератак неизменно растет. Так, по оценке вендора ИБ-решений ГК «Солар» (входит в структуры «Ростелекома»), число киберинцидентов за 2024 год увеличилось больше чем на четверть. По оценке экспертов Positive Technologies, количество именно успешных атак на российский бизнес в 2024 году относительно 2023 года выросло практически в два раза. При этом киберпреступники активно адаптируются к изменениям IT-ландшафта российских организаций: например, эксплуатируют уязвимости именно в отечественном программном обеспечении (ПО), говорят в компании[248].

[247] Разбираем тренды в мире DDoS-атак : отчет StormWall за третий квартал 2024 [Электронный ресурс] // StormWall. — URL: https://stormwall.pro/resources/blog/otchet-o-ddos-atakah-2024-tretij-kvartal (дата обращения: 07.11.2025).

[248] Киберзащитная реакция [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. — 07.02.2025. — URL: https://www.kommersant.ru/doc/7480689 (дата обращения: 07.11.2025).

Таблица 2.3.1. Структура Киберинцидентов в России по отраслям за 2024[249]

| **Критичные случаи** | **Отрасль** | **Некритичные случаи** |
|---|---|---|
| 14,3 | Информационные технологии | 19,8 |
| 27,7 | Промышленность | 31,3 |
| 9,5 | Ритейл | 4,3 |
| 1,6 | Гостинично-ресторанный бизнес | 2,3 |
| 4,5 | Медиа и реклама | 5,0 |
| 14,2 | Телеком | 9,4 |
| 17,0 | Финансы | 16,6 |
| 7,0 | Здравоохранение | 5,8 |
| 2,0 | Госсектор | 4,0 |
| 0,1 | Образование | 0,3 |
| 0,4 | Транспорт | 0,35 |
| 1,4 | Энергетика | 0,5 |
| 0,1 | Девелопмент | 0,3 |

Следует также отметить, что во всех этих отраслях используются цифровые двойники. Кроме того, решающее значение имеет рассмотрение этических последствий владения и использования данных.

Кибератаки наносят крупный финансовый ущерб компаниям. По данным Центра приема жалоб на мошенничество в Интернете при ФБР, США выпустило ежегодный отчет[250] о преступлениях в интернете, согласно которому только в 2022 году ФБР получило более 800 000 жалоб, связанных с киберпреступлениями, а общая сумма убытков превысила 10 миллиардов долларов. Ежегодно сумма ущерба имеет тенденцию к росту (Рис 2.3.2.).

[249] Там же.

[250] Internet Crime Report [Электронный ресурс] // FBI. — URL: https://www.ic3.gov/AnnualReport/Reports/2022_IC3Report.pdf (дата обращения: 17.11.2025).

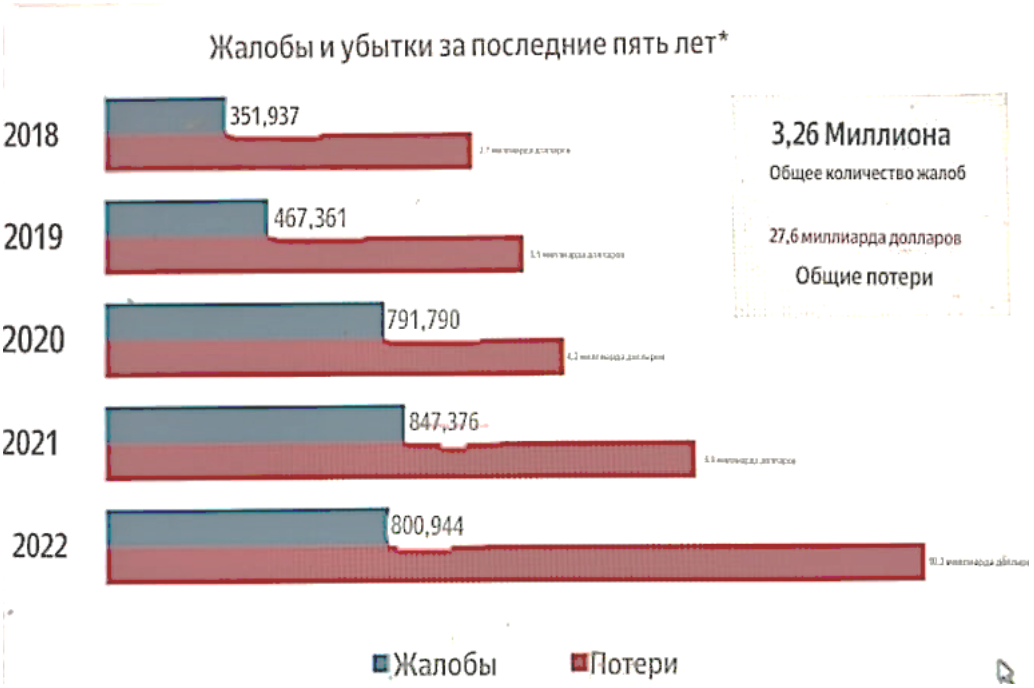



Рисунок 2.3.2. Динамика ущерба от кибератак в США[251]

По данным Сбербанка мошенники похитили у россиян около ₽300 млрд в 2024 году, при этом наиболее распространенными схемами стали кража данных от аккаунтов «Госуслуг» и фальшивые сообщения в мессенджерах. Не обходят своим вниманием и предприятия.

По оценкам компании Positive Technologies, в РФ в 2023 году и первой половине 2024-го наибольшее количество атак пришлось на промышленные предприятия (11%), телекоммуникации (10%), госучреждения (9%) и ИТ-компании (7%). Эксперты установили, что основными последствиями успешных атак на организации стали утечки конфиденциальной информации (41%) и нарушение основной деятельности (37%)[252].

Среди наиболее активных хактивистских групп, чья деятельность была направлена против объектов в РФ, в исследовании Threat Zone 2025 отмечены: Head Mare, Phoenix Hyena, Phoenix Hyena, "Кибер-Партизаны" (Belarussian Cyber

[251] Internet Crime Report [Электронный ресурс] // FBI. — URL: https://www.ic3.gov/AnnualReport/Reports/2022_IC3Report.pdf (дата обращения: 17.11.2025).

[252] Потери от киберпреступности [Электронный ресурс]. — URL: https://clck.ru/3QF8TS (дата обращения: 17.11.2025).

Partisan), KibOrg, Twelve, Blackjack, Ukrainian Hacker Group, UHG, BO Team, IT Army of Ukraine[253].

Достижение баланса между доступностью данных для совместной работы и защитой конфиденциальной информации представляет собой сложную задачу, которая требует постоянного совершенствования технологий кибербезопасности и разработки строгих нормативных актов, регулирующих конфиденциальность данных в экосистеме цифровых двойников.

Внедрение цифровых двойников требует значительных первоначальных затрат и инвестиций в ресурсы, что создает серьезную проблему для организаций, особенно малых и средних предприятий (МСП).

Для создания точных цифровых копий требуются передовые технологии, такие как датчики Интернета вещей, высокопроизводительные вычисления и сложное программное обеспечение для моделирования. Эти технологии сопряжены со значительными сопутствующими затратами, из-за чего некоторым предприятиям сложно оправдать первоначальные инвестиции.

Внедрение цифровых двойников часто требует культурных изменений в организациях, требующих обучения персонала и переоценки традиционных процессов. Ресурсоемкость выходит за рамки финансовых соображений и охватывает время и человеческий капитал. Задача заключается в том, чтобы убедить предприятия в долгосрочных выгодах и рентабельности инвестиций (ROI), связанных с цифровыми двойниками, а также в предоставлении доступных решений и поддержки для снижения первоначальных барьеров для входа. Для решения этих проблем требуется комплексная стратегия, учитывающая как технологические, так и организационные аспекты внедрения цифровых двойников.

---

[253] Бевза Д. С атаками хактивистов связано 30 процентов всех киберинцидентов в РФ [Электронный ресурс] // Технологии. — 06.02.2025. — URL: https://rg.ru/2025/02/06/s-atakami-haktivistov-sviazano-30-procentov-vseh-kiberincidentov-v-rf.html (дата обращения: 17.11.2025).

# ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ЦЕЛЯХ ОПТИМИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ

## 3.1. Российский и международный опыт внедрения цифровых двойников в перспективных отраслях

Как было сказано во второй главе, основными причинами для масштабного внедрения цифровых двойников в промышленность стали «Повестка дня на период до 2030 года», внедрение нового налога на выбросы углерода и необходимость модернизации технологических процессов. Сокращение вредных выбросов в атмосферу было поставлено во главу угла. Использование цифровых двойников, как будет показано далее, позволяет снизить углеродный след благодаря незначительной модернизации существующей системы производства.

Прежде всего, определим, какие страны являются лидерами по выбросам вредных веществ в атмосферу. Соответственно, где необходимо в первую очередь модернизировать производство и сокращать уровень загрязнения.

Согласно отчету Европейской Комиссии «GHG Emissions of All World Countries», лидерами по глобальному загрязнению являются динамично развивающиеся страны: Китай, США, Индия, Россия, Бразилия и 27 стран ЕС. Суммарная доля выбросов этих стран достигает 61,6% мировых (см. рис. 3.1).

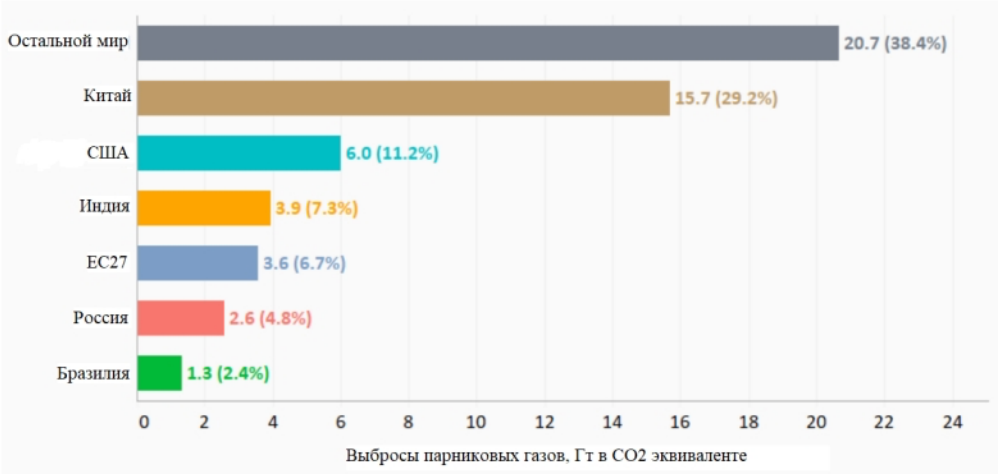



Рисунок 3.1.1. Выбросы парниковых газов по странам в 2023 году, в абсолютных показателях (Гт в CO2 эквиваленте) и в процентах[254]

[254] Получена автором на основании данных доклада Европейской Комиссии «GHG Emissions of All World Countries» [Электронный ресурс]. — URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023 (дата обращения: 04.06.2025).

Выбросы парниковых газов неуклонно растут с 1990 года, который считается одним из базовых для отслеживания глобального потепления климата. В основном этот рост происходит за счет увеличения выбросов углекислого газа Китаем, США и Индией, связано это с ростом промышленного производства в этих странах и потребностью в связи с этим в большом количестве энергии (см. рис. 3.1.2). Как можно увидеть из представленных ниже рисунков 3.1.2 и 3.1.3, основной рост выбросов парниковых газов приходится на энергетическую отрасль и промышленность.

Показатели доли парниковых газов в атмосфере снижались в 2020 году. Многие промышленные предприятия были остановлены из-за эпидемии COVID-19, потребность в энергии тоже сильно сократилась. В 2021 году, с открытием производств, выбросы вернулись к уровню 2019 года. В 2022 году мировые выбросы парниковых газов выросли на 1,4%. Это еще раз доказывает необходимость модернизации производственных и добывающих предприятий.




Рисунок 3.1.2. Рост выбросов парниковых газов по секторам промышленности в 2022 году в сравнении с 1990 годом, 2005 годом и в 2021 годом[255]

[255] Получена автором на основании данных доклада Европейской Комиссии «GHG Emissions of All World Countries» [Электронный ресурс]. — URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023 (дата обращения: 04.06.2025).

Основную долю выбросов составляет ископаемый CO2, 71,6% общего объема парниковых газов. На втором месте метан — 21%. Доля азота — 4,8%, а F-газов — 2,6%. Самый интенсивный рост выбросов в 2023 году наблюдался в Индии, +5% по сравнению с 2022 годом. Это связано с интенсивным развитием промышленности и возникающей в связи с этим значительной потребности в ископаемом топливе для производства энергии[256].

Поскольку предпринятые в последние годы контрклиматические действия, то есть масштабное внедрение ВИЭ, не привели к сокращению выбросов парниковых газов, следует предложить другие подходы к решению проблемы через модернизацию производства и внедрение цифровых двойников.

Проанализируем основные источники выбросов загрязняющих веществ и практики внедрения цифровых двойников в этих отраслях.

На рисунке 3.1.3 представлены основные источники эмиссии парниковых газов.

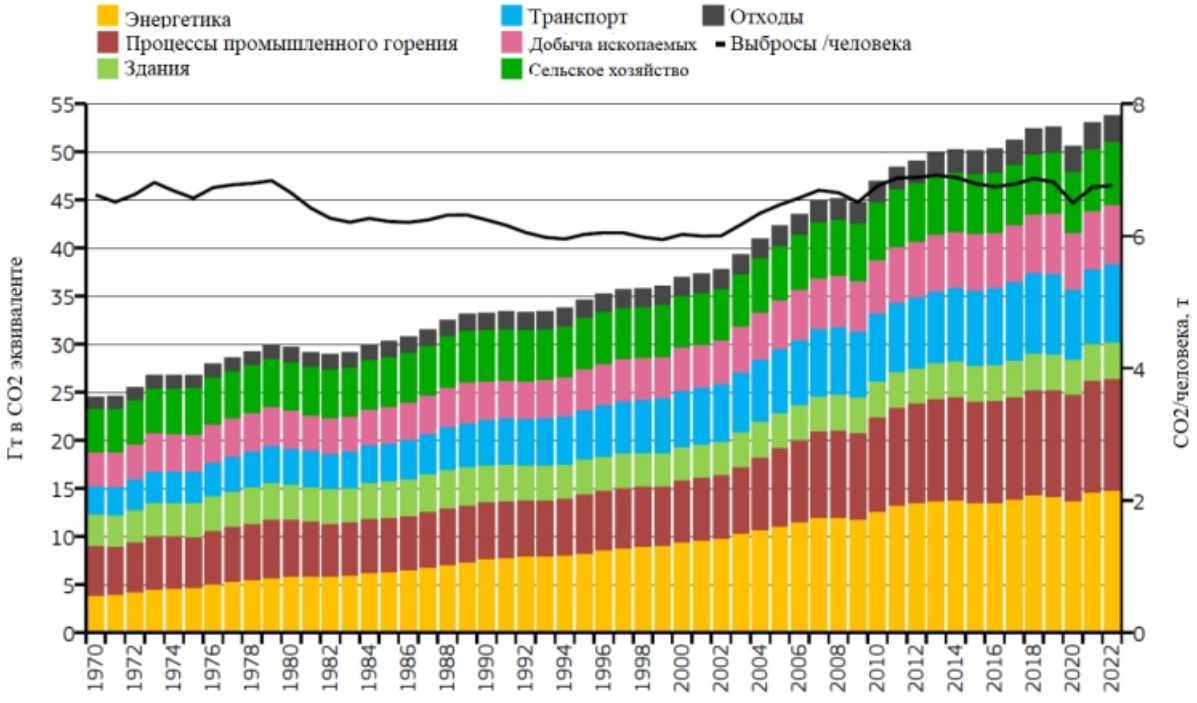



Рисунок 3.1.3. Основные источники выбросов парниковых газов[257]

[256] Доклад Европейской Комиссии «GHG Emissions of All World Countries» [Электронный ресурс]. — URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023 (дата обращения: 04.06.2025).

[257] Получена автором на основании данных доклада Европейской Комиссии [Электронный ресурс]. — URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023 (дата обращения: 04.03.2025).

Основная доля выбросов в атмосферу парниковых газов приходится на энергетику и промышленное производство. Это объясняется большим количеством угля, сжигаемого для получения электроэнергии. Например, при сжигании каменного угля в атмосферу выбрасывается 2,7-2,8 тонны CO2 на тысячу кубометров топлива в зависимости от марки угля[258]. Доля твердых бытовых отходов (ТБО) в источниках выбросов парниковых газов относительно небольшая (см. рис. 3.1.4.), но быстро растет.

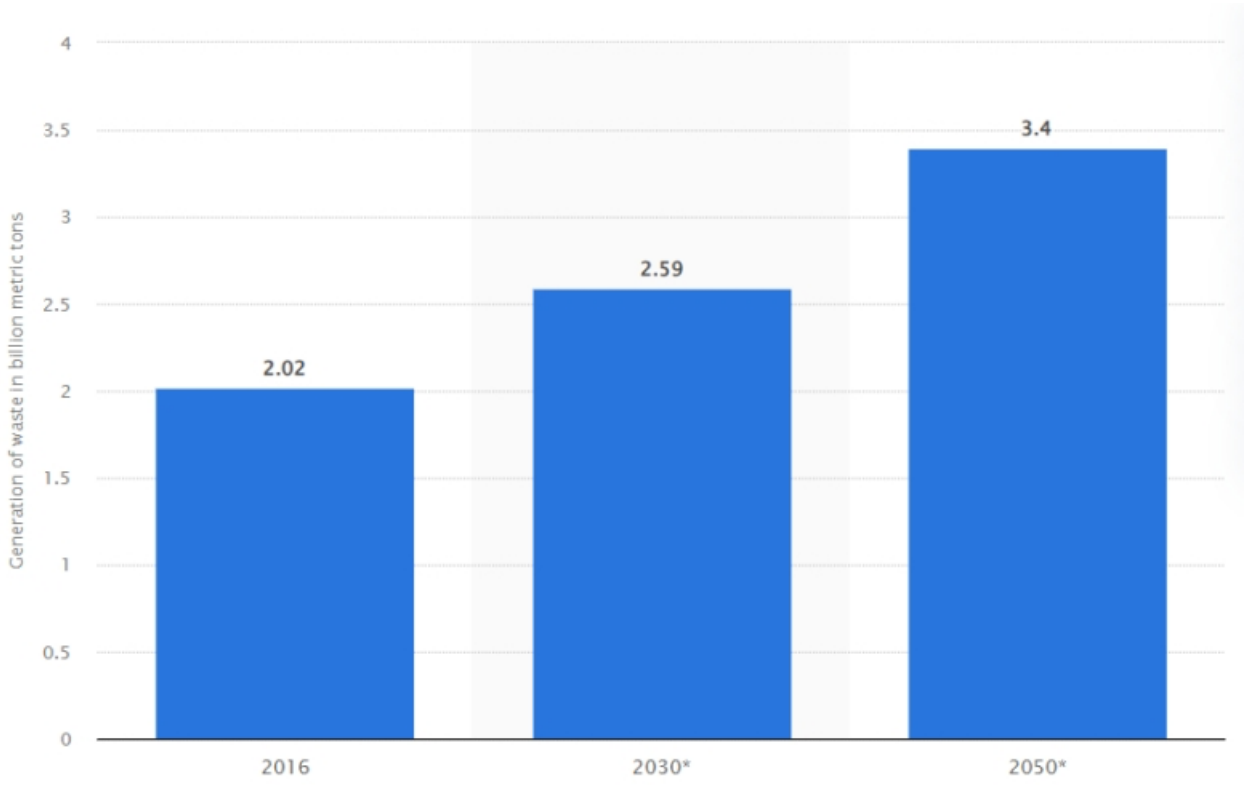



Рисунок 3.1.4. Прогнозируемое образование твердых бытовых отходов в мире с 2016 по 2050 год (в миллиардах метрических тонн)[259]

Автор данного исследования утверждает, что с сокращением выбросов парниковых газов, а также с утилизацией и преобразование в энергию бытовых отходов может помочь применение технологии цифровых двойников. Причем, технология позволяет сократить выбросы быстро и относительно недорого.

---

[258] Актуальные вопросы декарбонизации : ч. 1 / под науч. ред. М.Х. Салахова, М.С. Тагирова. — Казань : ФЭН, 2021. — 56 с.

[259] База данных Statista [Электронный ресурс]. — URL: https://www.statista.com/statistics/916625/global-generation-of-municipal-solid-waste-forecast/ (дата обращения: 26.06.2025).

Теоретическая концепция цифрового двойника была подробно рассмотрена в предыдущих главах исследования. Общая идея создания цифрового двойника сводится к тому, что в цифровой среде создается модель реального объекта (3D-модель или схема). С реального объекта снимаются показатели, обычно это делается с помощью различных датчиков и передаются на созданную модель. Дальше добиваются того, чтобы модель вела себя также, как реальный объект. После этого модель будет помогать находить экстремальные значения в различных узлах и сигнализировать об этом, напоминать о необходимости профилактики узлов, находить «узкие» места в работе системы, то есть узлы системы, снижающие пропускную способность всей системы, а, следовательно, ее эффективность.

Существует сценарный анализ «что, если». Он применяется как для моделирования аварийных ситуаций, так и для тестирования возможных изменений системы. Например, что будет, если поставить определенный фильтр в системы выброса отработанного газа или в трубе, через которую сточные воды сливаются в реку. Бывают ситуации, когда объект появляется еще до того, как его сделают в реальности. Так проектируют новые объекты, например, создают новые атомные электростанции и мусороперерабатывающие заводы по технологии «отходы в энергию» («waste to energy”). Также цифровой двойник помогает при модернизации уже существующих объектов инфраструктуры.

В данном исследовании нас интересует вопрос, как применение технологии позволяет снизить количество вредных выбросов в окружающую среду и примеры применения этой технологии в управлении объектами в разных странах мира.

Рассмотрим применение технологии цифрового двойника в основных отраслях, загрязняющих окружающую среду (в соответствии рис. 3.1.3).

Прежде всего разберемся, как работает цифровой двойник **в энергетике,** и каким образом его применение снижает уровень загрязнения окружающей среды.

Для начала инженеры рисуют схему энергетической системы. Эту схему реализуют в программе. Получившееся цифровое зеркало связывают с реальной системой, передавая показания с приборов и датчиков на цифровые аналоги в схеме. Далее идет отладка программы, в ходе которой добиваются практически

полного соответствия работы реальной и виртуальной энергетических систем. В обычном режиме работы цифровая система с определенной периодичностью подключается к реальной, получает информацию с датчиков, плюс информацию о температуре окружающей среды, влажности и другие внешние параметры. Система оповещает операторов об отклонениях системы от нормы и учится на основании принятых решений, предупреждает о необходимости профилактики и замены узлов энергоблока, помогает предотвратить аварии.

Модель цифровой электростанции позволяет просчитывать различные сценарии и находить потери «утечки» в контурах станции, благодаря математическим моделям, лежащим в их основе. Эти модели позволяют просчитать оптимальные сценарии работы электростанции, учитывая наиболее эффективное распределение нагрузки, выполнение условий договоров на поставку топлива и договоров на продажу электроэнергии. Из тысячи возможных сценариев можно выбрать сценарий максимизации прибыли в условиях существующего энергокомплекса или провести сценарный анализ по схеме «что, если», сделать ремонт, поставить дополнительный узел в энергоустановку. Также можно исходить из приоритета минимизации тепловых потерь и выбросов, то есть поставить во главу угла вопрос экологии. В этом случае, цифровая модель подберет режим работы существующей электростанции, позволяющий минимизировать выбросы вредных веществ, а также рассчитать эффект от установки дополнительных блоков в систему, например, новых фильтров[260].

Цифровые двойники могут применяться практически на любых энергетических установках: ТЭС, ТЭЦ, парогазовых и газотурбинных установках. Например, на ТЭЦ цифровой двойник помогает выбрать наиболее эффективный режим расходов топлива, контролируя в реальном времени количество энергии, необходимое тому или иному потребителю, не допуская «перетопов». Это экономит и деньги поставщика энергии, и сокращает количество выбросов вредных веществ в

[260] Кротова Т.Г. Применение цифровых двойников для борьбы с изменением климата странами — членами БРИКС / Т.Г. Кротова, Е.Б. Завьялова, С.Н. Синицын // Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. — 2025. — 27(1). — С. 167–180.

атмосферу и выделение лишнего тепла в системах охлаждения и на отапливаемых объектах. Цифровые двойники позволяют сократить повреждаемость теплосетей в среднем на 10%, тепловые потери на 1,5%, снижает потребление топлива и количество выбросов на 0,7-6%.

Применение такой технологии особенно актуально в Китае, который, как мы видели выше, является лидером по выбросам парниковых газов. Китайское правительство заявило о достижении пика выбросов парниковых газов в 2030 году, а уже в 2060 году страна должна стать углеродно нейтральной. Для реализации этих амбициозных планов в 2015 году был разработан план по достижению сверхнизких выбросов угольными ТЭС, подлежащими реконструкции. Это предполагает, что содержание сажи в выбросах должно быть меньше 10 мг/м$^3$, оксида серы меньше 35 мг/м$^3$, а оксида азота меньше 50 мг/м$^3$. Благодаря реализации этого плана уже в 2021 году в Китае был создан целый кластер угольных ТЭС со сверхнизким выбросом загрязняющих веществ в атмосферу, суммарная мощь которого составляет 93% мощности всех угольных электростанций Китая. Суммарные выбросы страны после этой модернизации составили: сажи — 123 000 т. (что на 69% меньше, чем в 2015 г), SO2 — 547 000 т. (что на 73% меньше, чем в 2015 году), NOx — 862 000 т., (то есть на 52% меньше аналогичного показателя 2015 года). Для этого на ТЭС были заменены старые энергоблоки и установлены новые, отличающиеся высокой мощностью, эффективностью, сверхнизким уровнем выбросов загрязняющих веществ и расходования воды. Высокий уровень автоматизации и использование программного обеспечения, позволяющего выбрать оптимальный режим работы энергоблока, помогает достигать таких показателей.

В **атомной энергетике** цифровые двойники помогают избежать аварий, выбирать оптимальные режимы работы и напоминают о своевременной профилактике и замене узлов АЭС. Атомная энергетика является одной из самых экологически чистых в процессе эксплуатации, то есть АЭС практически не выбрасывают в атмосферу парниковых газов, вырабатывая электроэнергию. Опасность представляют аварии на атомных электростанциях, подобные авариям

на Чернобыльской АЭС или в Фукусиме. Создание цифрового двойника существующих электростанций представляет собой крайне сложный процесс, ввиду высокой радиации в действующих системах атомного реактора и его охлаждения, а также необходимости установки датчиков, способных работать в таких условиях. При строительстве новых АЭС цифровой двойник создается совместно с созданием системы, а зачастую еще до ее практической реализации, что позволяет ввести в эксплуатацию практически абсолютно безопасный объект и следить за его работой в реальном времени, а также отрабатывать различные режимы работы реактора, включая аварии, землетрясения, цунами и т.д.

Корпорация Росатом, являющаяся лидером в России по применению цифровых технологий, строит АЭС в Индии. Проектная мощность атомной электростанции «Куданкулам» составит 6 ГВт. В состав АЭС будет входить шесть энергоблоков, работать она будет на современном ядерном топливе, поставляемом из России в восемнадцатимесячном цикле. Цифровой двойник от Росатома называется «Виртуально-цифровая АЭС». Он был разработан в 2020 году и применен на 6-ом энергоблоке Нововоронежской АЭС. Это, скорее всего, только начало во взаимодействии Индии и России в сфере мирного атома. Известно, что уже есть договоренности по строительству второй АЭС Росатомом на территории Индии.[261]

**При добыче полезных ископаемых,** прежде всего нефти, выделяется много попутного природного газа, транспортировка и продажа которого экономически нецелесообразна. Этот газ обычно сжигается на факелах.

Компания «Газпром нефть» в Ханты-Мансийске создала цифровой двойник одного из самых перспективных месторождений нефти. Он показал высокий экономический эффект после внедрения — дополнительный миллиард рублей в год от роста добычи и сокращения затрат на ремонтные работы и простой скважин. Но нас интересует сокращение выбросов парниковых газов, которому способствовало внедрение двойника.

---

[261] Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР [Электронный ресурс] // Росэнергоатом. — URL: https://www.rosenergoatom.ru/about/programmnye-produkty/virtualno-tsifrovaya-aes-s-vver/ (дата обращения: 17.11.2025).

Выделение парниковых газов при добыче, переработке и транспортировке ископаемых видов топлива является одним из основных источников $CO^2$ в атмосфере, однако, при современных технологиях, позволяющих использовать попутный газ для генерации электричества, обеспечивая циркуляционность и энергоэффективность производства, выбросы в атмосферу можно сократить до 2-6%. В ХМАО на месторождении, благодаря сценарному анализу в цифровом двойнике, было принято решение установить газотурбинные установки, которые работают на попутном природном газе. Электричество, генерируемое на этих установках, позволяет не только питать месторождение, но и продавать электроэнергию в Россети для снабжения Ханты-Мансийска[262].

**Твердые бытовые отходы** являются источником метана, отравляют почву и грунтовые воды, что сильно портит качество жизни населения поселков, расположенных вблизи свалок. Обратимся к рисунку 3.4. Количество ТБО в 2016 году на планете насчитывало два миллиарда метрических тонн. К 2030 году при сохранении текущей тенденции их будет уже 2,59 млрд метрических тонн, а к 2050 году при сохранении текущей тенденции их количество вырастет в 1,7 раза по сравнению с базовым 2016 годом. Таким образом, проблема переработки ТБО становится все более актуальной для всего человечества. При переработке твердых бытовых отходов может быть использована технология преобразования энергии сжигания отходов в энергию (WTE). Здесь цифровой двойник используется для возведения и контроля за работой технически сложного предприятия по переработке ТБО, преобразующего энергию горения в электрическую энергию. Описание такого проекта в Китае далее по тексту.

Проект Шеньчженьского Восточного завода по переработке отходов в энергию (Shenzhen East Waste-to-Energy Plant) представляет собой гигантский завод по регенерации энергии из мусора. Он строится в Шэньчжене. Завод позволяет перерабатывать рекордные 5,6 тысяч тонн мусора в день. Полученную при

[262] «Газпром нефть» создала цифровой двойник месторождения имени Александра Жагрина [Электронный ресурс] // Российское газовое общество. — URL: https://www.gazo.ru/ru/news/members/gazprom-neft-sozdala-tsifrovoy-dvoynik-mestorozhdeniya-imeni-aleksandra-zhagrina/ (дата обращения: 17.11.2025).

сжигании твердых отходов энергию преобразуют в электрическую энергию. Проектная мощность станции составляет 165 МВт. Когда завод выйдет на проектную мощность, он будет перерабатывать треть отходов, образующихся в Шэньчжэне и генерировать 550 млн кВт/ч электроэнергии в год.

При строительстве была использована технология цифрового двойника CNIM Digital Twin. Проект очень сложный и дорогой, технология WTE (переработки отходов в энергию) на порядок дороже обычного мусоросжигательного завода. Кроме того, перед проектировщиками была поставлена задача минимизации площади строительной площадки для снижения нагрузки на окружающую среду. Было принято решение построить здание круглой формы (а не прямоугольное, как обычно), чтобы сократить объем земляных работ и свести к минимуму площадь установки. Проект разрабатывался с 2016 года. Все шесть колосниковых решеток, система подачи на эти решетки, котел, центральный турбоагрегат со сдвоенными дымовыми трубами, гидравлические системы были сначала реализованы в цифровом пространстве. Кроме того, проект завода предполагает, что на крыше завода, составляющей 66 000 кв. м будут смонтировано 44 000 кв. м солнечных панелей для производства электричества для нужд завода. Управляться вся сложная система будет из центра принятия решений, куда будут передаваться все показатели с приборов и узлов, в том числе, показатели выброса вредных веществ в атмосферу[263].

Аналогичный проект возводится в другой провинции Китая — Тяньцзине. Использование технологии цифрового двойника позволяет до минимума сократить время проектирования при реализации типовых проектов, максимально сократить ошибки при проектировании и время простоя строительных бригад.

Кроме того, с использованием технологий WTE и цифрового двойника будет построен подобный мусороперерабатывающий завод в другой стране БРИКС — ОАЭ. Он будет располагаться в Шардже. Стоимость проекта составляет 220 млрд

[263] Schmidt H.L. Shenzhen Energy Ring, A Simple, Clear Form [Электронный ресурс] / H.L. Schmidt. — URL: https://www.theplan.it/eng/award-2024-Public-Space/shenzhen-energy-ring-a-simple-clear-form-schmidt-hammer-lassen (дата обращения: 07.08.2025).

долл. США, проектная мощность переработки твердых отходов 37,5 тыс. тонн в час для 30МВт электричества. Реализация этого проекта позволит достичь нулевого вывоза твердых отходов на свалки в Шардже[264].

Кроме твердых бытовых отходов очень важно **управление и очистка сточных вод.**

Цифровые двойники можно использовать для проектирования и строительства объектов инфраструктуры, в том числе экологической направленности. В Китае строится крупнейшая в Азии станция по отчистке сточных вод. Проект Бэйху покрывает порядка 130 кв. км сетей канализации, которые обслуживают 2,48 миллиона человек. Площадь самих очистных сооружений будет составлять 532 тыс. кв. км., проектная мощность на финальном этапе будет составлять 1,5 млн тонн очистных вод в сутки. Для реализации этого сложнейшего проекта компания China Railway Shanghai Engineering применяет технологию цифрового двойника. В данном случае, проект сначала был реализован в цифровом пространстве, все 30 объектов: насосные станции, фильтры, сепараторы, распределительные скважины.

Цифровой двойник позволяет смоделировать процессы усадки и деформации, использует интерактивного цифрового двойника при реализации проектов очистных сооружений, включающих высокочувствительные мембранные и биологические бассейны, вышеуказанные процессы в которых могут привести к растрескиванию, затягиванию и удорожанию проекта. Кроме того, перед инженерами поставлена сложно выполнимая задача произведения минимальных доработок на местности при монтировании встроенных втулок в конструкциях и размещении технологических отверстий. Чтобы реализовать этот проект, компания использовала технологию BIM. Создание проекта в цифровом пространстве при таком подходе начинается с скрупулезной съемки местности с беспилотных аппаратов, чтобы точно расположить построенные узлы системы на месте. В

[264] Завершено строительство первого завода по переработке отходов в энергию в ОАЭ [Электронный ресурс]. — URL: https://www.wam.ae/ru/article/hszrem3e-завершено-строительство-первого-завода-переработке (дата обращения: 17.11.2025).

цифровом двойнике проектируется все: от моделирования арматуры до проектирования стройплощадки, максимально эффективной и безопасной.

Реализация проекта с использованием этой технологии уже позволила добиться значительной рентабельности инвестиций в проект. Использование математических моделей в расчетах двойника значительно упростило проектирование и сборку высокочувствительных стенок бассейна (на этом этапе было сэкономлено 2,3 млн юаней), изменение способа проектирования и монтажа арматуры, выбранных благодаря двойнику, сэкономило 1,71 млн юаней и 25 рабочих дней; формирование графика выполнения работ бригадами с помощью двойника позволило сократить сроки строительства еще на 121 день, что сэкономило еще 1,27 млн юаней.

Снижение выбросов париковых газов **в сельском хозяйстве**.

Снова обратимся к рисунку 3.1.3. В лидерах по выбросам парниковых газов является сельскохозяйственная отрасль. Основными газами, выбрасываемыми в атмосферу, здесь являются метан и закись азота. В этой отрасли есть прямые и косвенные источники парниковых газов. К прямым, например, относятся выбросы метана сельскохозяйственными животными и выращивание риса. К косвенным можно отнести вырубку лесов под сельскохозяйственные угодья и внесение удобрений. Если смотреть в долях от общего количества выбросов, то выращивание риса вносит 10% всех мировых выбросов метана. Внесение азотных удобрений является источником около 5% парниковых газов[265].

Технология использования цифровых двойников в сельском хозяйстве на животных повлиять не может, зато очень хорошо поможет оптимизировать контроль за ростом растений, внесение удобрений, оптимальное количество влаги и переработку отходов. Цифровой двойник для агрокомплексов разрабатывают множество компаний во всем мире: ARANCA, IBM, Blue River Technology, Gartner, Accenture, КРОК, Ctrl2Go и др. Они объединяют все сельскохозяйственные

[265] Удобрения влияют на климат сильнее всей мировой авиации и судоходства [Электронный ресурс]. — URL: https://agbz.ru/news/udobreniya-vliyayut-na-klimat-silnee-vsey-mirovoy-aviatsii-i-sudokhodstva/ (дата обращения: 07.11.2025).

процессы на одной платформе, от подготовки почв и машин до прогнозирования урожая, и цен на рынке. Это позволяет не только повысить урожайность, сократить издержки, но и снизить количество вредных выбросов. В данном исследовании нас будет интересовать только двойник поля, где выращивается сельскохозяйственная культура.

Прежде всего создается двойник поля с помощью сканирования со спутников, дронов и информации с датчиков. Потом это поле в программе делится на участки. Каждый участок имеет свой набор показателей: увлажненность, кислотность и т.д. Вводится понятие эталонного участка с максимальными показателями урожайности, больше которой на данном поле получить нельзя. Остальные участки сравнивают с эталонным и смотрят, какое количество удобрений необходимо внести, чтобы «дотянуть» показатели данного участка до показателей эталонного. То есть аграриям не приходится вносить удобрения на все участки одинаково, они переходят к «точечному» земледелию, что позволяет сокращать количество вносимых удобрений и сокращать выбросы парниковых газов.

Рис — особенная культура, требующая большого количества воды, которой должны быть покрыты растения. В этой среде заводятся особые бактерии, которые выделяют метан. Вторым источником метена является рисовая солома, остающаяся после сбора урожая на полях. Чтобы снизить объемы выбросов метана ученые и институты рекомендуют сокращать производство риса и переходить, например, на ячмень. Но страны, где эта культура составляет основу питания, такие как Китай и Индия, не готовы ставить под угрозу свою продовольственную безопасность в угоду климатической повестке.

Подобрать оптимальный уровень воды на полях и организовать переработку рисовой соломы в энергию могут помочь цифровые двойники. Этот опыт могут передать аграрии Кубани (Россия), где благодаря внедрению уникальных разработок при минимальном уровне слоя воды удается получить 6,5 тонн с гектара, при среднемировых показателях 0,46 тонн с гектара.

Снижение **выбросов транспортом** и снижение **углеродного следа городов.**

Как мы видим из рисунка 3.1.3, одними из основных источников парниковых газов являются здания и транспорт. Это прежде всего относится к проблемам городов. Необходимо повышать энергоэффективность зданий и сокращать выбросы от транспорта.

Большинство решений было представлено в области городской мобильности. Выбросы от городского транспорта тем больше, чем больше на дороге машин и чем больше времени они простаивают в пробках с незаглушенными двигателями. Следовательно, снижение проблемы выбросов от транспорта в городе — это проблема городской инфраструктуры и доступности общественного транспорта по сравнению с транспортом личным. Цифровой двойник города помогает решить эти проблемы. Цифровой двойник города — это не только 3D-модель его улиц. В цифровой копии города отражены послойно дорожная сеть, сети водопроводных и электрических, оптоволоконных и газовых коммуникаций. Многочисленные датчики собирают информацию о системах жизнеобеспечения города и передают ее в центры обработки данных. Благодаря сценарному анализу градостроители могут отрабатывать различные сценарии прокладки новых дорог и модернизации старых, выбирать из них не только реализуемый с учетом существующих коммуникаций, но и добиваться наибольшей пропускной способности дорог. Планирование сетей и маршрутов городского наземного транспорта и моделирование новых веток метро, пересадочных узлов и перехватывающих парковок в самых густонаселенных районах помогает сделать общественный транспорт более привлекательным, что будет стимулировать людей отказаться от личного транспорта и пересесть на общественный. Система датчиков под дорожным покрытием, интеллектуальные дорожные камеры и «умные» светофоры помогают следить за обстановкой на дорогах, быстрее выезжать на места аварий, переключать сигналы светофора в зависимости от загруженности перекрестков.

Повысить энергоэффективность города также поможет цифровой двойник. Датчики освещения помогают реализовать концепцию «умного» уличного освещения. Это возможно в двух вариантах: либо уличное освещение загорается и гаснет в зависимости от продолжительности светового дня и освещенности на

улице, либо фонари на улице загораются, реагирую на движение и вовсе не горят, когда на улице никого нет. Подачу тепла в дома также помогает регулировать цифровой двойник города, а также оптимизировать расход ресурсов, электричества, воды — все это помогает стать городу максимально энергоэффективным и снизить экологическую нагрузку.

Помимо всего вышесказанного, цифровое зеркало города помогает предвидеть проблемы и чрезвычайные ситуации, прорабатывать сценарии пожаров, землетрясений, наводнений и других стихийных бедствий, чтобы в случае опасности иметь возможность подготовиться и максимально нивелировать последствия, избежать экологических катастроф.

Именно на создании цифровых двойников городов сделали упор в Индии, Китае, России и Бразилии, где города очень густо населены.

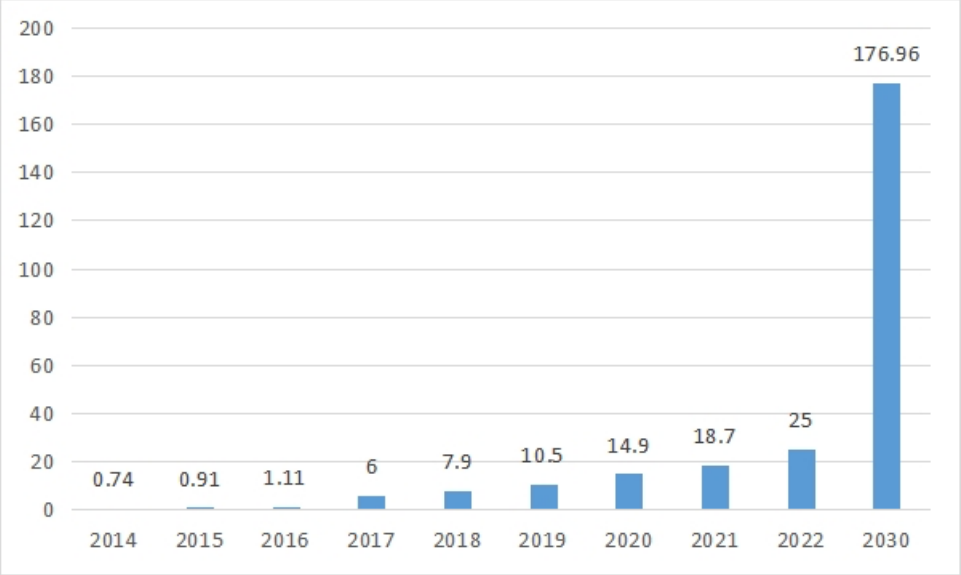



Рисунок 3.1.5. Рост рынка умных городов в Китае в период с 2014 по 2022 годы, трлн юаней + прогнозный 2030 год[266]

Китай делает основной акцент на развитии «умного транспорта», как составляющей «умного города» (см. рис 3.1.5). Около 70% сосредоточено именно

[266] Получен авторами на основании данных China Smart City Industry Market Analysis 2022 [Электронный ресурс]. — URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/china-smart-city-market-88009927.html; https://froodl.com/china-smart-cities-market-industry-analysis-growth-trends-and-forecasts-2023-2030 (дата обращения: 17.11.2025).

на преобразовании транспортного сектора. Одной из основных целей является снижение количества выбросов от автомобилей в городе. Для этого развивается система, названная «умной мобильностью», когда двойник транспортной системы помогает построить оптимальный для человека маршрут с использованием различных видов общественного транспорта, включая сервисы аренды автомобилей и других средств индивидуальной мобильности. Развитие этого сервиса составляет более 80% от общего рынка «умного транспорта». Остальную долю занимает рынок интеллектуального управления дорожным движением, развитие которого помогает снизить количество пробок, а, следовательно, количество выбросов в атмосферу выхлопных газов автомобилей, стоящих в этих пробках.

Аналогичным путем идет и Россия, реализуя в Москве и в других городах концепцию «умного города» и концепцию «умной мобильности». Благодаря внедрению умных технологий были наиболее удобным для горожан образом изменены маршруты наземного городского транспорта и максимально сокращены интервалы между прибытием автобусов на остановки общественного транспорта в часы пиковой нагрузки. В городскую систему транспорта включены электропоезда и автобусы из пригорода и минимизировано время пересадки с одного вида транспорта на другой. Внедряется система распознавания лиц для «бесшовного» прохода и оплаты метро, тем самым сокращается время в очередях на покупку проездных билетов. Открыто множество перехватывающих парковок около станций метро для жителей Подмосковья, чтобы люди могли оставить личный автомобиль и воспользоваться общественным транспортом. Власти города ставят перед собой цель сокращения времени в пути от дома до работы для 90% москвичей до 45 минут при условии пользования общественным транспортом и тем самым стимулировать людей пересаживаться с личных автомобилей на общественный транспорт, что позволит сократить количество пробок в городе и улучшить экологическую ситуацию. Уже в среднем на дороги Москвы выезжает только 3 млн автомобилей из 8,5 миллионов, находящихся в собственности у москвичей.

В Индии были созданы цифровые двойники уже более ста городов, от Нью-Дели до Солапура. В Бразилии уже на 2020 год насчитывалось 166 стартапов в области концепции «умного города», привлекших 50 млн долл. США инвестиций.

## 3.2. Модернизация производственных мощностей и обеспечение безопасности ЦД

Заявленные во второй главе задачи коренной модернизации технологических процессов, высокие цены и риски технологических катастроф на предприятиях могут быть решены с помощью цифровых двойников, позволяющих контролировать и симулировать различные ситуации на производстве, в том числе аварии.

Целью данного параграфа является демонстрация возможностей совершенствования технологического процесса на примере реализации цифрового двойника в добывающей промышленности и современные методы информационной безопасности на предприятиях для нивелирования рисков кибератак на технологическую инфраструктуру.

Построением цифровых двойников занимаются практически все добывающие компании по всему миру. Это во многом связано с упомянутыми выше целями: экологизации производства, повышения эффективности, ростом конкурентоспособности компании на мировом рынке. [267]

В данном исследовании в качестве примера будет рассмотрен цифровой двойник, созданный компанией «Газпром нефть» на месторождении имени Александра Жагрина[268].

Как заявляет компания, ее стратегия до 2030 года заключается в повышении гибкости и трансформации всех бизнес-процессов. Для реализации этой стратегии,

---

[267] Загурский А.В. Анализ рынка цифровых двойников и перспективы его развития [Электронный ресурс] / А.В. Загурский // Актуальные исследования. — 2024. — №11(193). — Ч. II. — С. 21–24. — URL: https://apni.ru/article/8721-analiz-rinka-tsifrovikh-dvojnikov-i-perspekti (дата обращения: 07.11.2025).

[268] «Газпром нефть» создала цифровой двойник месторождения имени Александра Жагрина [Электронный ресурс] // Российское газовое общество. — URL: https://www.gazo.ru/ru/news/members/gazprom-neft-sozdala-tsifrovoy-dvoynik-mestorozhdeniya-imeni-aleksandra-zhagrina/ (дата обращения: 17.11.2025).

компания стремиться стать лидером в своей отрасли по эффективности, технологичности и безопасности. Это подразумевает рост добычи с темпами, опережающими средние по отрасли, максимизацию созданной стоимости каждого барреля добытой нефти. В реализации данной стратегии ключевая роль отдается цифровой трансформации и созданию цифровых двойников для всех бизнес-процессов[269].

Для «Газпром нефть» месторождение имени Александра Жагрина является основным активом нефтяного кластера в Ханты-Мансийском автономном округе. Открыто оно было в 2017 году. Ресурсный потенциал составляет 840 млн тонн нефти. Уровень добычи в 2023 году составлял 5,5 млн тонн нефти в год. Запланированный уровень добычи — 8 млн тонн нефти в год. Это современное месторождение, представляющее собой сложный комплекс взаимосвязанных систем. В него входят: добывающие и нагнетающие воду скважины, системы хранения и подготовки нефти, сепаратор, газовая электростанция, трубопроводы, остальная инфраструктура. Целью создания цифровой копии месторождения, является автоматизация и оптимизация всех рабочих процессов.

Оценить эффект от запуска на месторождении цифровой копии можно по росту добычи, сокращению случаев поломки оборудования, оптимизации времени работы скважин, снижению количества выездов на скважину и обслуживания оборудования. Положительный эффект по каждому пункту зависит от того, насколько уже модернизировано месторождение. Если месторождение новое и на нем стоит современное оборудование, то положительный эффект будет меньше, так как потери уже минимизированы.

В таблице 3.2.1 представлены некоторые результаты от внедрения цифрового месторождения в различных компаниях по всему миру. Прирост текущего уровня добычи нефти и газа у компании «Газпром нефть» составляет 1–5%, а у Chevron 4-18%. Это связано с тем, что производство у российской нефтедобывающей компании новее и гораздо лучше оптимизировано. Примечательно, что для

[269] Стратегия развития «Газпром нефть» до 2030 года [Электронный ресурс]. — URL: https://www.gazprom-neft.ru/company/about/strategy/ (дата обращения: 06.07.2025).

компании BP прирост добычи на 2,5–5,5% в физическом объеме составляет больше 85 тыс. баррелей нефти в день. При текущей цене за баррель 68,57 долл. США рост выручки составляет 5,8 млн долларов в день.

Сокращение выездов на скважины у Chevron и «Газпром нефть» составляет 30%, немного меньше этот показатель у BP (25%). Сокращение трудозатрат у всех компаний, представленных в таблице 3.1, находится на уровне 20%. Для компаний это значительная статья расходов. Снижение данных расходов позволяет сократить количество высокооплачиваемого персонала. Особенно это важно для отечественной компании, добыча которой находится в суровых условиях Сибири, где выезды на месторождения и людской труд стоят дорого.

Таблица 3.2.1. Эффективность от внедрения технологий интеллектуального месторождения[270]

| Компания | CERA | Accenture | BP | Chevron | Газпром Нефть |
|---|---|---|---|---|---|
| Прирост текущего уровня добычи нефти и газа | 1–6% | 2–6% | 2,5–5,5% >85тыс.бар /день | 4–18% | 1–5% |
| Сокращение выездов на скважин | | | 25% | 30% | 30% |
| Сокращение простоев скважин — 10% | 1–4% | | | 5–10% | 10% |
| Снижение порывов трубопроводов | | | | 8–12% | |
| Повышение МРП текущего оборудования | | | 0,5% | 1% | 5% |
| Сокращение трудозатрат | 5–25% | 11–21% | 25% | | 20% |
| Сокращение потерь добычи нефти и газа | | | | | 3% |

[270] Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти [Электронный ресурс]. – URL: https://statcontrol.ru/static/or.pdf (дата обращения: 11.11.2025 год).

Помимо перечисленных в таблице 3.2.1 данных, компании «Газпром нефть», благодаря внедрению цифровой копии месторождения, удалось сократить капитальные затраты на 15%.[271]

Разберем подробнее, за счет чего добиваются такого роста эффективности актива.

Общая идея построения цифрового двойника месторождения представлена на рисунке 3.2.1.

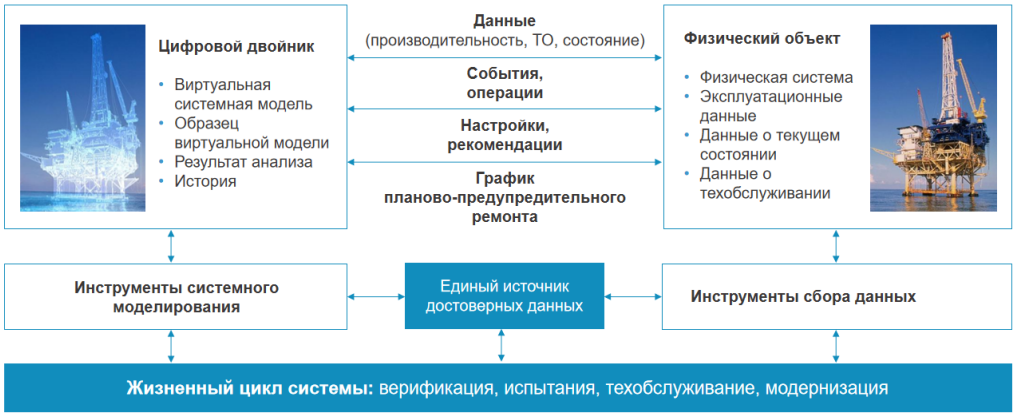



Рисунок 3.2.1. Цифровой двойник[272]

Существует физический объект, со своими характеристиками и эксплуатационными данными, например, эксплуатационная мощность насосов, рабочее давление, температура сроки прохождения технического обслуживания и т.д. Во всех узлах системы установлены датчики, собирающие и передающие информацию о текущем состоянии системы: уровне добычи, текущем давлении, температуре, внешних погодных условиях. В цифровом формате создается точная копия существующей системы с виртуальными узлами, на которые наложены ограничения реальных узлов. На эту виртуальную систему подаются данные с датчиков реальной системы и симулируется рабочий процесс, происходящий в реальной системе. Задача цифрового двойника на данном этапе – показывать

[271] Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти [Электронный ресурс]. – URL: https://statcontrol.ru/static/or.pdf (дата обращения: 11.11.2025 год).

[272] Там же.

практически стопроцентное соответствие показателям работы физической системы.

Виртуальный двойник, полученный в результате, представляет собой цифровую копию месторождения, в которой можно детально контролировать каждый узел и процесс, изменять параметры объекта, добавлять объекты, изменять режимы работы. Тем самым выбирая оптимальный режим работы всей системы и реализуя его на реальном месторождении (см. рис. 3.2.2.).




Рисунок 3.2.2. Интегрированная модель актива[273]

Созданная интегрированная цифровая модель осуществляет непрерывный анализ рабочего процесса. Текущие показатели можно сравнить с эталонными, которые могут быть достигнуты в текущей конфигурации производства. На основании полученных данных система дает операторам рекомендации по настройке оборудования, что позволяет оптимизировать работу системы. Виртуальная цифровая копия позволяет проводить сценарный анализ, то есть разыгрывать различные сценарии: авария на производстве, ввод в эксплуатацию новых узлов, температурные аномалии, профилактическая остановка оборудования, проигрывать различные варианты включения и выключения скважин на месторождении. То есть цифровая модель берет на себя функции

[273] Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти.

операционного планирования. В этом заключается огромная ценность цифрового двойника для менеджмента на производстве.

*Автоматическая настройка модели и моделирование процесса*

Система использует при управлении адаптивную модель. Адаптивная модель — это модель, уточняющаяся по мере накопления информации об объекте. Система производит настройку коэффициентов математической модели технологического процесса на основе измеряемых параметров.

Точность модели достигается за счет автоматической настройки в режиме реального времени. Суммарная точность модели должна обеспечить возможность персоналу наблюдать различные ситуации, как если бы они происходили в реальном технологическом процессе. Требуемая точность в пределах 1% от регламентных (или измеряемых) значений технологических параметров. Для построения математической модели во время самообучения должно проводиться экспериментальное исследование статических и динамических свойств объекта. Экспериментальное исследование является пассивным, т.е. система не вносит возмущающие воздействия, а лишь регистрирует реакцию процесса на случайные возмущения во время нормальной работы и внештатных ситуаций. На основе уточненной модели система формирует и представляет в реальном времени достоверную оперативную информацию о движении материальных потоков в процессе производства.

Для построения модели в системе используется специальное программное приложение. Оно позволяет проектному инженеру выполнить дизайн системы или внести необходимые изменения без использования специальных языков программирования. Конфигурация технологического процесса производится путем использования элементов из библиотеки, соединением их согласно топологии месторождения и указанием параметров оборудования согласно паспортным данным. Стандартная библиотека позволяет пользователю определить конфигурацию системы с помощью стандартных элементов (библиотека включает набор моделей стандартного оборудования, позволяющего построить конфигурацию всех технологических процессов на месторождении). Программное

приложение цифровой копии позволяет выполнить полный проект системы оптимизации в единой среде проектирования с использованием одного программного модуля.

Программный комплекс позволяет работать с моделью в режимах: онлайн и офлайн. В режиме онлайн модель соответствует текущей топологии и составу оборудования, подключена к внешним данным, идет непрерывный процесс самообучения модели. В этом режиме производится оптимизация процесса и снижение эксплуатационных затрат. Производится самодиагностика системы: мониторинг в режиме реального времени за состоянием системы, серверов и функционировании программных приложений. Предоставляется детальная информация о неисправности серверов системы, «звучит» предупредительная сигнализация об ошибках системы и программных приложений.

В режиме офлайн модель, соответствующая текущей топологии и составу оборудования, выгружена на отдельный сервер и отключена от внешних данных, что позволяет вносить изменения в состав оборудования и топологию модели. Это позволяет выполнять режим симуляции «что-если».

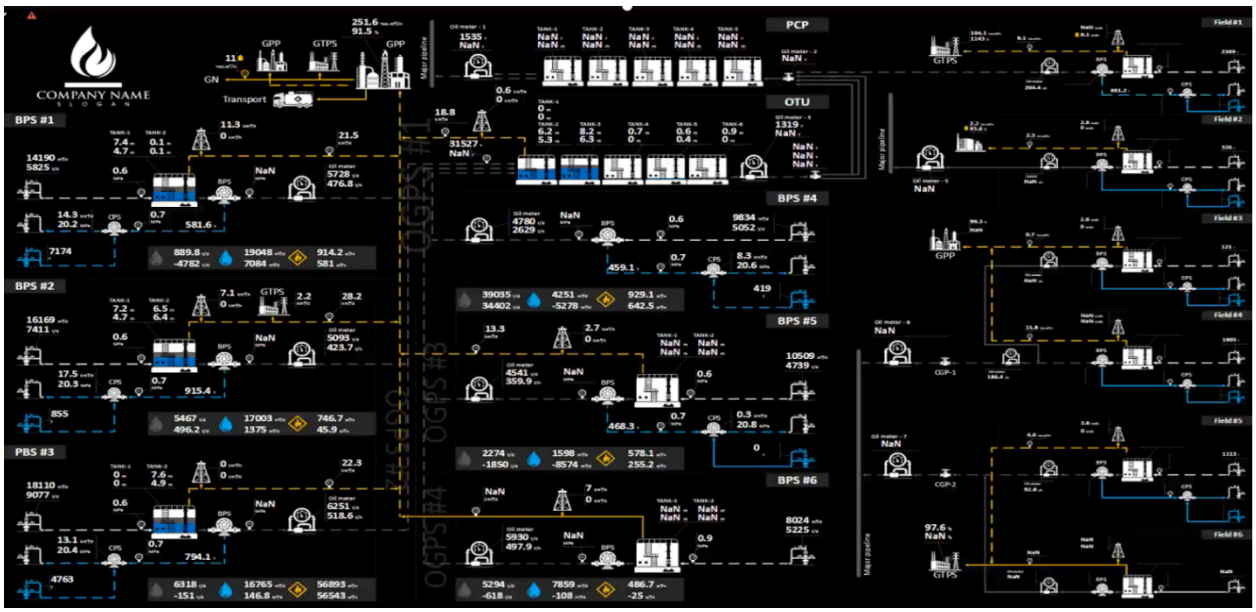



Рисунок 3.2.3. Создание цифровой модели актива из стандартной библиотеки элементов, наложение на виртуальную модель параметров реального актива в онлайн режиме[274]

*Определение потенциала актива и симуляция процессов*

Потенциал актива определяется как разница между максимально достижимым уровнем добычи и фактической добычей. Оценить потенциал актива и сценарии выхода на заданный уровень добычи – первостепенная задача виртуальной модели месторождения (см. рис. 3.2.4.). На рисунке схематично представлена система добычи нефти на месторождении. Каждому узлу соответствует своя пропускная способность или производительность. Производительность месторождения зависит от производительности каждого узла систем. Однако общая производительность всей системы определяется пропускной способностью самого «узкого» места. Выявить такое место – нетривиальная задача, даже для опытного инженера.

[274] Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти.

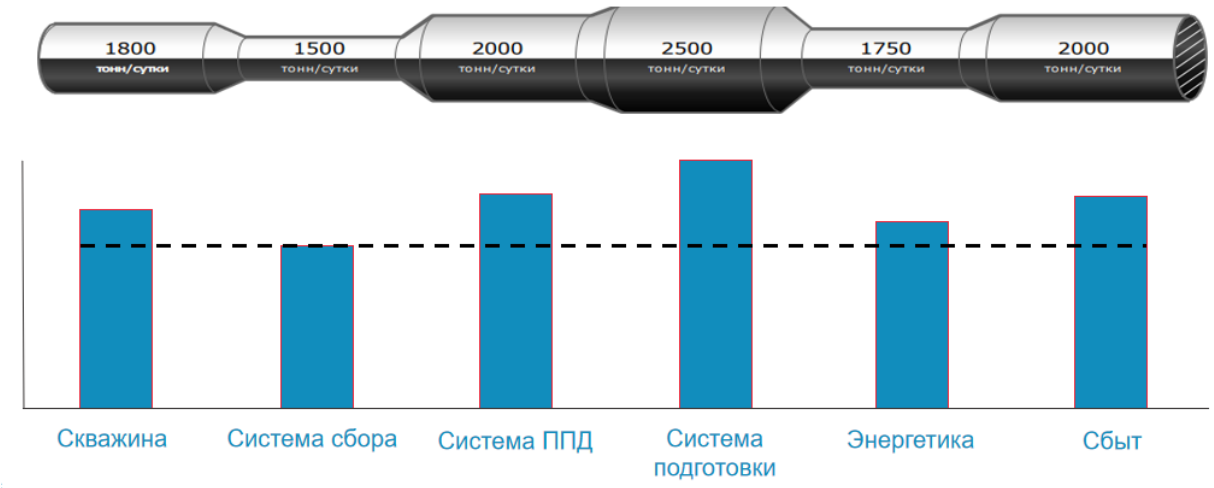



Рисунок 3.2.4. Определение потенциала системы добычи[275]

Продемонстрировать оценки потенциала актива позволяет рисунок 3.2.4 Система состоит из скважин, инфраструктуры сбора нефти, системы подготовки, поддержания пластового давления, подготовки энергетики и сбыта. Каждый модуль обладает своей пропускной способностью. Общая пропускная система, представленная на рисунке 3.2.4., составляет 1500 тонн нефти в сутки. Она ограничена мощностью системы сбора нефти. Именно это позволяет оценить цифровой двойник. На основании этого анализа можно принять управленческое решение по увеличению пропускной способности системы сбора. При модернизации этого модуля далее система будет ограничена пропускной способностью энергетической системы.Таким образом цифровая копия позволяет решать задачу оценки потенциала добычи месторождения.

Далее производится анализ потенциала каждого узла месторождения (см. рис. 3.2.5.). Анализ, производимый программой, позволяет видеть текущий уровень добычи, превышение проектной мощности оборудования, из-за которой происходят потери и быстрый износ оборудования, максимальную ценность, которую можно получить на месторождении при текущем уровне технологий, если устранить все потери в системе. Главное, цифровая модель позволяет оценить максимальную ценность и предложить варианты развития системы, например,

[275] Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти.

бурение дополнительной скважины или дополнительной трубы для транспортировки нефти.

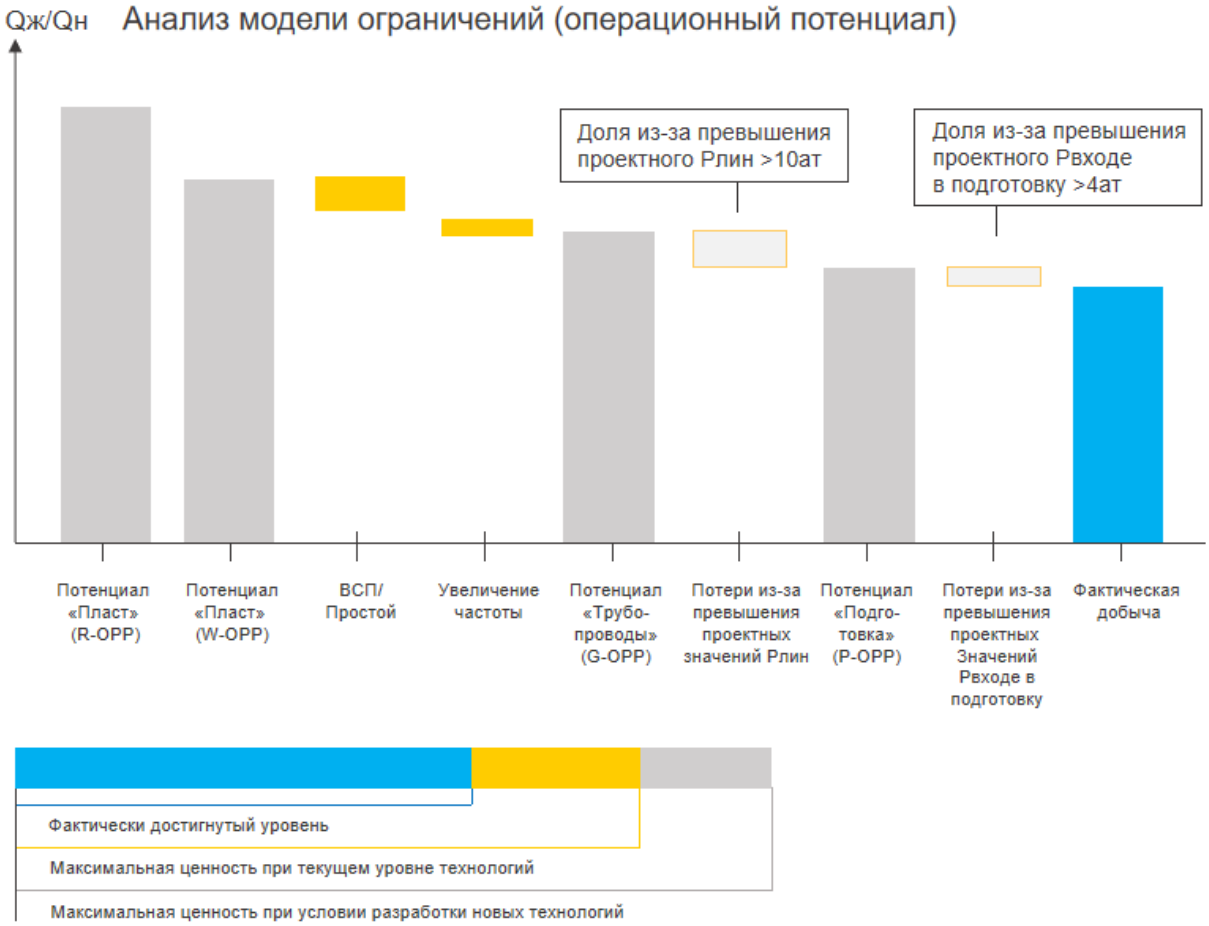



Рисунок 3.2.5. Определение потенциала добывающего комплекса в цифровой копии месторождения[276]

Именно благодаря таким возможностям цифровой копии осуществляется оптимизация добычи с учетом потенциала каждого узла системы.

Система обменивается данными с различными уровнями информационных систем, объединяя данные, получаемые в режиме реального времени с месторождения, с историческими данными в цифровую модель процесса. Эта модель позволяет осуществлять прогнозирование на основании встроенному блоку математического моделирования. Математическое моделирование процесса —

[276] Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти.

определение его статических и динамических характеристик. Моделирование производственных процессов состоит из шести основных этапов:

– обработка данных: импорт данных, хранение, первичная обработка и систематизация;

– построение модели: широкий спектр статистических и математических методов моделирования с целью определения прогнозируемых результатов;

– автоматическая настройка модели: сочетает в себе настройки параметров модели и сравнение с переменными реального производственного процесса для непрерывных обеспечений необходимого уровня точности;

– симуляция, прогнозирование поведения процесса на основе модели;

– поиск на основе симуляции процесса оптимальных режимов работы;

– реализация в реальном времени управляющих воздействий, соответствующих критериям оптимизации (или рекомендация к реализации).

На практике это означает, что функциональная возможность цифровой копии месторождения позволяет принимать крайне важные управленческие решения. Симуляция или функция «что, если» представляет из себя функцию моделирования ситуации. Например, ситуация, экстремального повышения давления, пожара на объекте, внешние погодные условия, выходящие за рамки рабочих и влекущие за собой отказ аппаратуры. Моделирование аварийной ситуации позволяет отработать слаженные действия персонала и минимизировать последствия. Существует возможность отработать и позитивные сценарии. Что, если пробурить дополнительную скважину, построить дополнительную насосную станцию, провести вторую ветку нефтепровода. Это позволяет рассчитать рентабельность таких проектов и выбрать наиболее выгодный способ вложения инвестиций (рис. 3.2.6).




Рисунок 3.2.6. Принятие управленческих решений на основании симуляции производственных процессов[277]

*Расчет рентабельности актива*

Цифровой двойник добычи нефти имеет ряд модулей, рассчитанный на различные группы пользователей: инженеры, менеджеры, совет директоров, бухгалтерия. Пользователи имеют доступ только к необходимым для них модулям.

Один из основных модулей для менеджеров — модуль рентабельности (см. рис. 3.2.7.) Он позволяет оценивать все финансовые потоки на различных горизонтах времени. Например, суточный денежный поток, рассчитанный на основании разницы доходов и расходов, также представленных для анализа, включая доходы от реализации нефти и газа, расходы на операционные издержки и налоговые сборы.

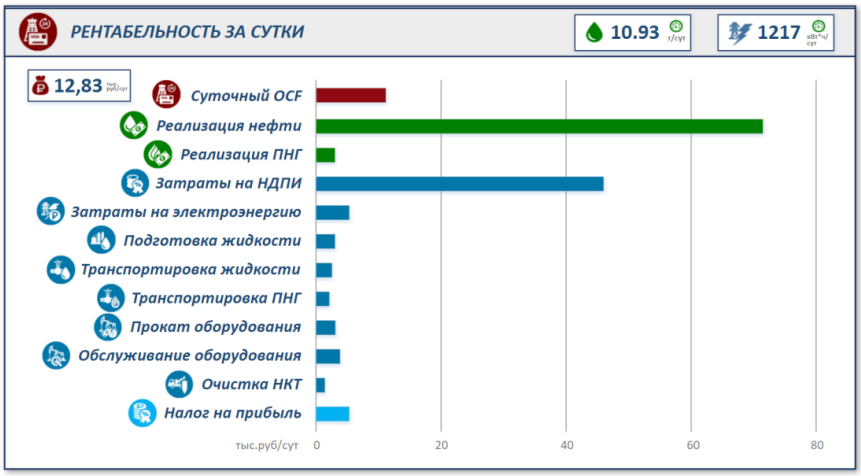



Рисунок 3.2.7. Блок «рентабельность»[278]

Расчеты осуществляются по доходам и расходам. Доходы считаются от продажи нефти и газа. В расходы записываются по затратам на операционные издержки и налогам (см. рисунок 3.2.7).

---

[277] Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти.

[278] Там же.

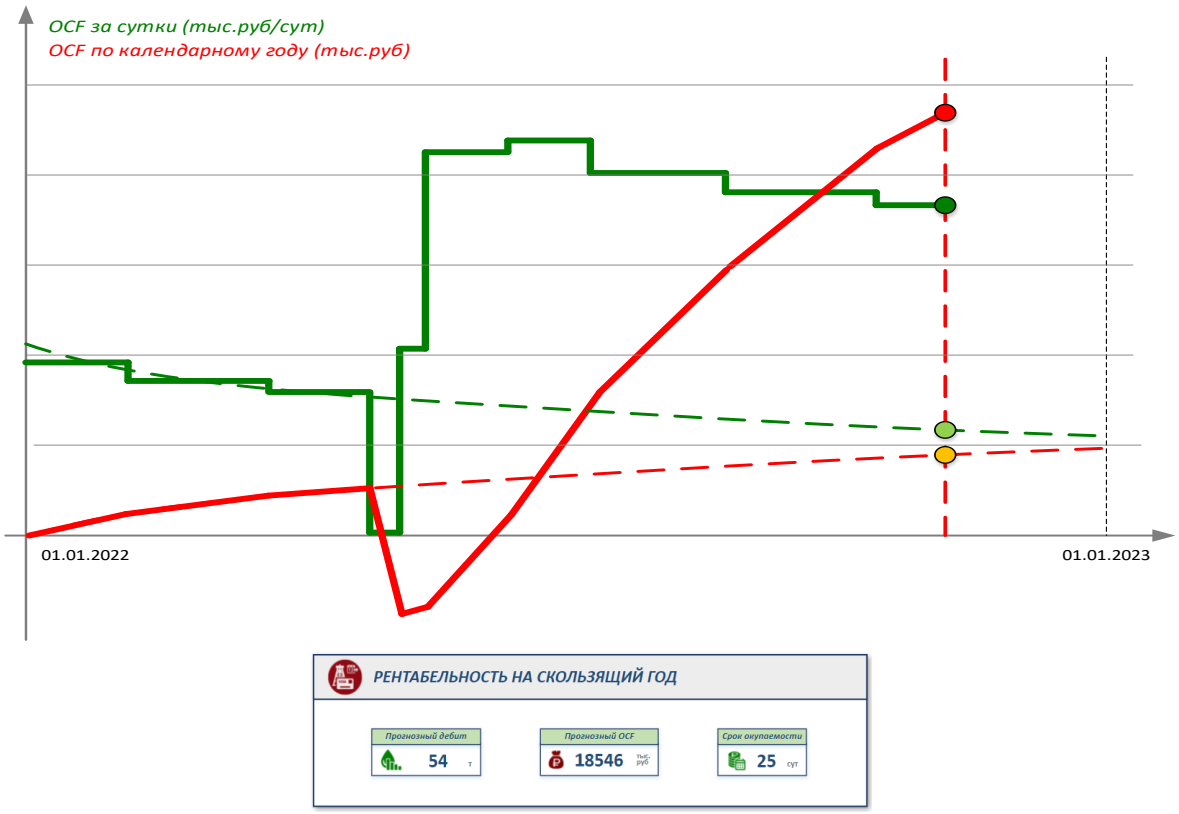



Рисунок 3.2.8. Рентабельность внедрения цифрового двойника месторождения за сутки и за год[279]

На рисунке 3.2.8 представлен пример расчета денежного потока за сутки и по календарному году. Пунктирная линия показывает оценку денежных потоков без применения цифровой копии месторождения, сплошные линии — после внедрения цифрового двойника на нефтедобыче. Точка, где графики начинают расходиться, представляют собой момент необходимых работ при подключении и интеграции цифровой модели и необходимая остановка производственных мощностей. Значительный рост денежных потоков после внедрения цифровой копии на месторождении — наглядное свидетельство экономической эффективности цифровой копии месторождения.

Модуль рентабельности также позволяет сравнивать показатели за различные периоды времени, в том числе сравнить финансовые результаты до внедрения на месторождении цифровой копии и после (см. рис. 3.2.9).

[279] Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти.

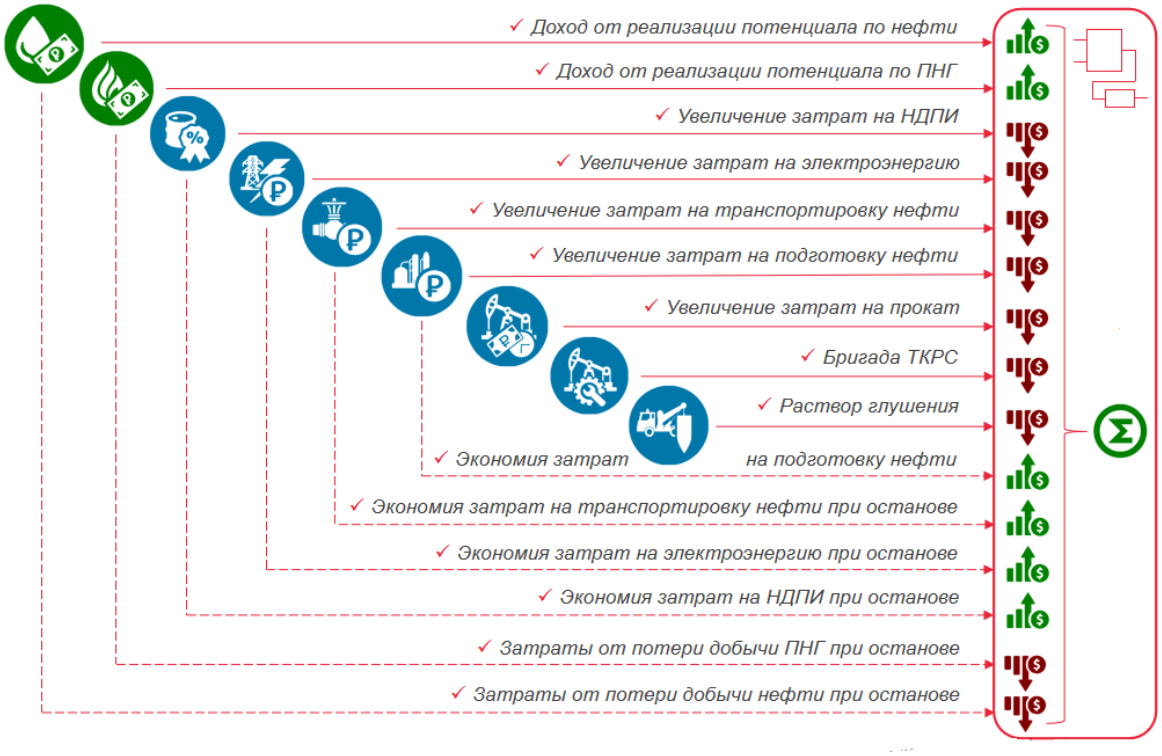



Рисунок 3.2.9. Оценка изменения основных финансовых показателей до подключения цифровой копии и после[280]

На рисунке 3.2.9 приведены данные по изменению ключевых показателей на месторождении имени Александра Жагрина после полноценного внедрения цифрового двойника на производстве. Зафиксирован рост доходов реализации нефти и попутного газа, сокращение постоянных и переменных расходов., сокращение потерь при добыче нефти и попутного газа.

*Центр принятия решений*

Информация со всех модулей цифрового двойника стекается в центр принятия решений. Условно работу центра принятия решений можно представить по рисунку 3.2.10.

[280] Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти.




Рисунок 3.2.10. Центр принятия решений[281]

В центре принятия решений круглосуточно осуществляется мониторинг по ключевым параметрам эффективности (KPI) и решаются сложные операционные задачи благодаря технологиям моделирования в режиме реального времени. Это позволяет обеспечить эффективность принятия решений с помощью соответствующих технологий и отсутствие персонала в опасных локациях на добыче, повышение эффективности за счет работы в единой информационной среде.

Замкнутый цикл управления производства в режиме реального времени на основе планирования позволяет снизить энергопотребление и максимизировать показатели производства. Динамические факторы распределения позволяют уменьшить количество устройств для понимания поведения потока в распределительных трубопроводах. Консолидированное управление потоком обеспечивает создание ценности с использованием ключевых параметров

[281] Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти.

эффективности в режиме реального времени, что означает снижение целого ряда затрат.

На месторождении имени Александра Жагрина центр принятия решений следит за работой 3 500 добывающих скважин, 1 200 нагнетательных скважин, 250 добывающих кустов, 11 нефтеперерабатывающих установок, 5 электростанций, 300 км сети нефтетранспортных трубопроводов, сети трубопроводов для транспортировки жидкости протяженностью 6000 км, экспортных газопроводов. ЦОД осуществляет моделирование, симуляцию и оптимизацию всей цепочки создания ценности. Цифровой двойник месторождения обеспечил рост добычи нефти и газа до 5%, сокращение выездов на скважины на 30%, сокращение времени простоя скважин на 10%, увеличение межремонтного ресурса оборудования на 5%, снижение трудозатрат до 20%, повышение производительности труда до 25%, сокращение потерь при добыче нефти и газа на 30%, снижение капитальных затрат на 15%[282].

*Обеспечение информационной безопасности на промышленных предприятиях*

Следующим важным вопросом, поставленным во второй главе, является вопрос информационной безопасности на крупных промышленных предприятиях. Высокая степень автоматизации и цифровизации делает крупные, критически значимые для экономики предприятия уязвимыми перед хакерскими атаками. Такие атаки способны в течение долгого времени разрушать промышленную систему, как это делал вирус Stuxnet, атаковавший ядерные объекты Ирана. Вирус поразил 1368 из 5000 центрифуг на обогатительном заводе и привел к их физическому разрушению, разогнав до неприемлемых значений. Это сильно сдвинуло сроки запуска АЭС в Бушере[283]. Вирусы, нацеленные на промышленные объекты, способны вызвать масштабные отключения электроэнергии, как

[282] «Газпром нефть» создала цифровой двойник месторождения имени Александра Жагрина [Электронный ресурс] // Российское газовое общество. — URL: https://www.gazo.ru/ru/news/members/gazprom-neft-sozdala-tsifrovoy-dvoynik-mestorozhdeniya-imeni-aleksandra-zhagrina/ (дата обращения: 17.11.2025).

[283] Stuxnet: война 2.0 [Электронный ресурс]. — URL: https://habr.com/ru/articles/105964/ (дата обращения: 18.07.2025).

Industroyer, предназначенный для нарушения рабочих процессов в промышленных системах управления и определенные устройства релейной защиты[284].

Количество атак на промышленные объекты неуклонно растет. Если в 2018 году доля атак на промышленные предприятия составляла 10% от общего числа хакерских атак, то в 2024 году эта доля достигла 26%[285], причем 10% этих атак приходится именно на системы промышленного контроля, к которым относятся цифровые двойники производства. Статистика в России соответствует общемировым трендам. За первое полугодие 2025 года число хакерских атак на промышленные предприятия выросло на 27% и превысило 63 тысячи. Основные угрозы, степень их воздействия и потенциальный ущерб от них представлены в таблице 3.2.1.

Больше всего на производстве используют программы-вымогатели, 27% всех атак в первом полугодии 2025 года и 71% в 2024 году. Это вредоносное программное обеспечение, которое проникает в систему промышленных предприятий при переходе сотрудников по сомнительным ссылкам из писем, рассылок сообщений, или занесенное на физическом носителе, например, флэш-карте. Программа зашифровывает все данные в системе предприятия и требует передать выкуп, обычно в криптовалюте, за получение кода для дешифровки данных. Инсайдерские угрозы связаны с подкупом сотрудников или устройством на работу в компанию людей, занимающихся промышленным шпионажем на другие фирмы. Программы шпионы могут проникать в систему промышленного предприятия так же, как и программы-шифровальщики, а могут быть установлены заранее в оборудовании, поставляемом на предприятия и промышленные объекты. Эти программы следят за трафиком и дублируют его по заранее указанному адресу. Так злоумышленники прилучают доступ ко всем данным зараженной системы.

---

[284] Win32/Industroyer: новая угроза для промышленных систем управления [Электронный ресурс]. — URL: https://habr.com/ru/companies/eset/articles/330730/ (дата обращения: 21.07.2025).

[285] Доля кибератак в обрабатывающей промышленности по всему миру с 2018 по 2024 год [Электронный ресурс] // Statista. — URL: https://www.statista.com/statistics/1374061/cyber-attacks-manufacturing-share-worldwide/ (дата обращения: 21.07.2025).

Целевые атаки представляют собой вредоносное программное обеспечение, написанное для нарушения работы конкретной системы. Это самые дорогие атаки, они готовятся под конкретное предприятие и оборудование, как это было сделано с центрифугами на ядерных объектах Ирана. Удачные целевые атаки приводят к масштабным диверсиям и сбою в работе крупных промышленных систем. Энергетическая отрасль является приоритетной при атаках хакеров. За 2024 год число инцидентов на объектах критической энергетической инфраструктуры, телекоммуникации и транспорта выросло на 30%.

Обычные пакетные антивирусные программы для бизнеса не подходят для решения задач защиты от целевых атак на промышленные предприятия. Соответственно и обеспечение кибербезопасности в различных отраслях требует уникального решения.

Таблица 3.1.2. Основные виды хакерских атак на промышленные предприятия и степень их воздействия[286]

| Вид хакерской атаки | Уровень угрозы для предприятия | Частота атак за 1-е полугодие 2025 | Возможный ущерб |
|---|---|---|---|
| Программы-шпионы | Критический | 45% всех атак | Промышленный шпионаж, кража технологий |
| Инсайдерские угрозы | Высокий | 37% всех атак | Саботаж на производстве утечка данных |
| Программы-шифровальщики | Критический | 27% всех атак | Остановка производства, крупный выкуп |
| Целевые атаки (Advanced Persistent Threat) | Критический | 35 атак | Саботаж на производстве, шпионаж |
| Атаки через поставщиков ПО | Критический | Рост в 3 раза в 2024 году | Утечка данных |
| Фишинг и социальная инженерия | Высокий | Рост на 28% за 2024 год | Утечка данных |

[286] Составлена автором по данным Inner Engineering [Электронный ресурс]. — URL: https://inner.su/articles/tablitsa-ugroz-promyshlennykh-sistem-2025-virusy-kiberataki-uyazvimosti/ (дата обращения: 21.07.2025).

Защита промышленных предприятий должна строится на многоуровневой системе противодействия хакерским атакам. Согласно статистике, за 2025 год, 77% промышленных предприятий стремятся соответствовать стандартам информационной безопасности.

Институциональную основу защиты программного обеспечения промышленных объектов в нашей стране формируют следующие стандарты:

– ГОСТ Р 56205-2014 — «Сети коммуникационные промышленные. Защищенность (кибербезопасность) сети и системы. Часть 1-1. Терминология, концептуальные положения и модели» (основан на базе международного стандарта IEC 62443-1-1);

– ГОСТ Р 56498-2015 — «Защищенность (кибербезопасность) промышленного процесса измерения и управления» (основан на базе международного стандарта IEC 62443-3);

– ГОСТ Р МЭК 62443-2-1-2015 — «Составление программы обеспечения защищенности (кибербезопасности) системы управления и промышленной автоматики»;

– ГОСТ Р МЭК 62443-3-3-2016 — «Национальный стандарт Российской Федерации. Сети промышленной коммуникации. Безопасность сетей и систем. Часть 3-3. Требования к системной безопасности и уровни безопасности» (основан на базе международного стандарта IEC 62443-3).

Эти стандарты разработаны на основе серии международных стандартов защиты промышленных объектов IEC 62443. В них сформулированы базовые требования к безопасности эксплуатации производственных объектов, использующих автоматизированные системы производства и управления.

В ГОСТах прописан ряд принципов. Ключевой — принцип многоуровневой защиты. Согласно этому принципу, создается подход к безопасности зон внутри

предприятия. По мере формирования баз данных инцидентов, разработки математических моделей угроз, рисков эта концепция будет постепенно заменяться концепцией верификации уровней безопасности (SL). Этот подход будет применяться как к промышленным предприятиям, так и к поставщикам автоматизированных комплексов управления и контроля на производстве и систем безопасности.

Прежде всего выявляются уровни угрозы для качественного определения уровней безопасности на производстве: «низкий», «средний», «высокий». Эта работа проводится совместно с собственниками предприятия, так как критическими являются разные угрозы для каждого конкретного производства. Цель, которая ставится на этом этапе, — сведение как можно большего числа требований безопасности к количественным описаниям, системам показателей для возможности повторного применения продукта для групп промышленных предприятий со схожей спецификой производства.

Уровни безопасности разбиваются на три типа: целевые, достигнутые и потенциальные. Целевой уровень безопасности — уровни безопасности, которые должны быть достигнуты. Они определяются исходя из оценки рисков для конкретной системы и установления достаточного уровня безопасности для гарантированного, бесперебойного функционирования системы. Достигнутые уровни безопасности — текущие уровни безопасности при внедрении на производстве автоматизированной системы. Потенциальные — уровни безопасности, которые могут быть достигнуты в установленной на производстве системе при правильной ее конфигурации и настройте, указывают на то, что некоторые компоненты системы изначально могут соответствовать целевым показателям безопасности, без дополнительной защиты.

На практике это означает, что организации прежде всего следует разработать проект, содержащий целевые показатели уровней безопасности. Затем идет разработка системы, отвечающей этим целям. При этом тестируются все компоненты системы и выявляются фактические показатели безопасности и сравниваются с целевыми. Выбираются компоненты системы, потенциальные показатели которых соответствуют целевым показателям безопасности и компоненты, нуждающиеся в дополнительной защите. Система сдается заказчику, когда фактические показатели уровней безопасности соответствуют целевым показателям.

Разработку новой системы безопасности продемонстрирован на рисунке 3.2.11. На первом этапе при разработке новой системы безопасности (зеленое поле рисунка) или усовершенствовании существующей системы (коричневое поле рисунка) производится разбивка на зоны безопасности и определяются тракты, связывающие между собой полученные зоны. Затем каждой зоне и тракту присваивается свой целевой уровень безопасности на основании анализа рисков и последствий взлома.

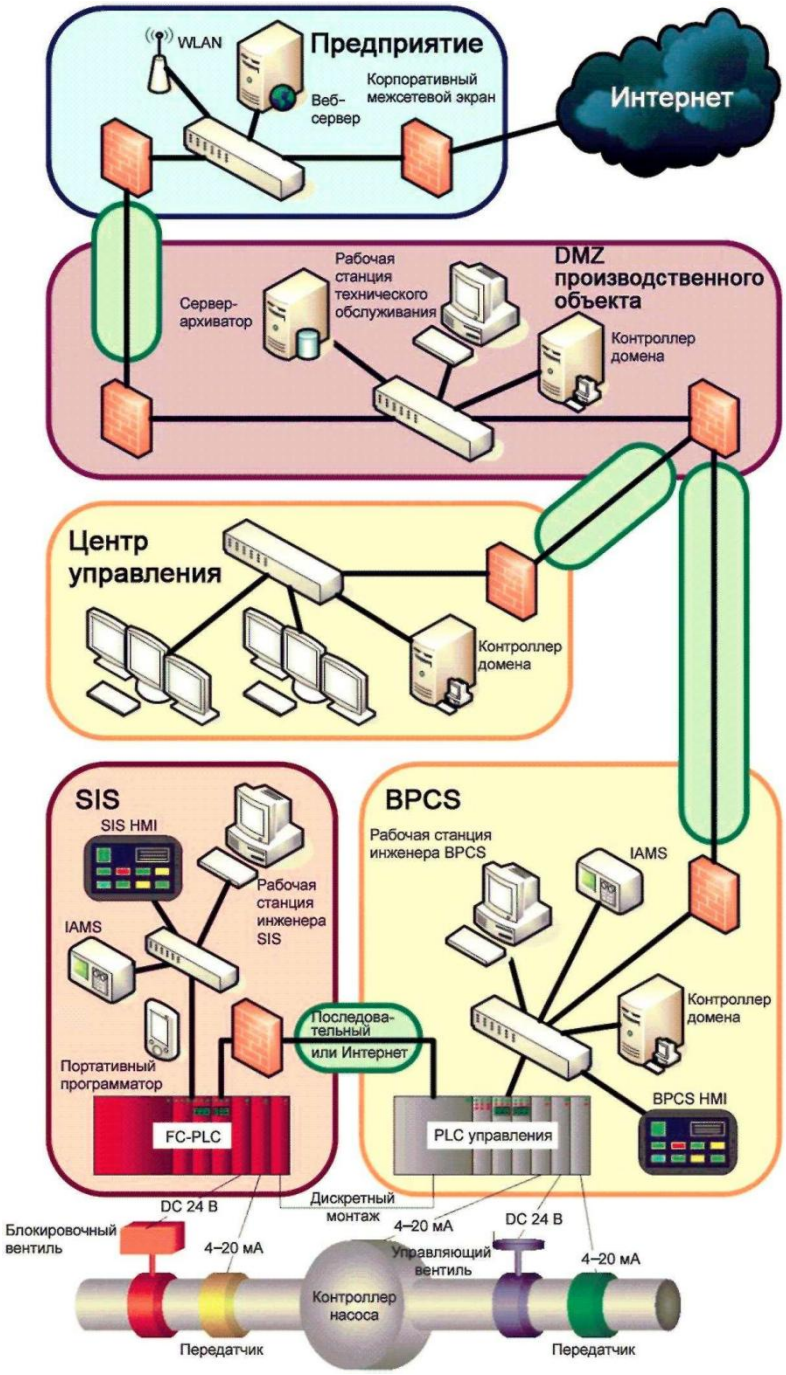



Рисунок 3.2.11. Общий пример из обрабатывающей промышленности, иллюстрирующий зоны и тракты[287]

После определения целевых уровней безопасности перерабатывается архитектура существующей системы или разрабатывается новая система (зеленое поле) для соответствия целевым параметрам безопасности.

---

[287] Национальный стандарт Российской Федерации : сети коммуникационные промышленные : защищенность (кибербезопасность) сети и системы : часть 1-1 : Терминология, концептуальные положения и модели [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/1200114169 (дата обращения: 17.11.2025).

Существует вероятность того, что в проекте отдельные компоненты невозможно настроить так, чтобы они соответствовали целевым показателям SL. В этом случае следует предусмотреть компенсационные контрмеры для достижения целевых показателей уровней безопасности. Эти контрмеры могут предполагать изменение проекта компонента или всей системы, подбор другого компонента или добавление новых компонентов. После каждого изменения в системе проверяется соответствие фактического уровня безопасности целевому уровню.

В общем виде обеспечение безопасности любой системы, вне зависимости от ее назначения, представлено на рисунке 3.2.12

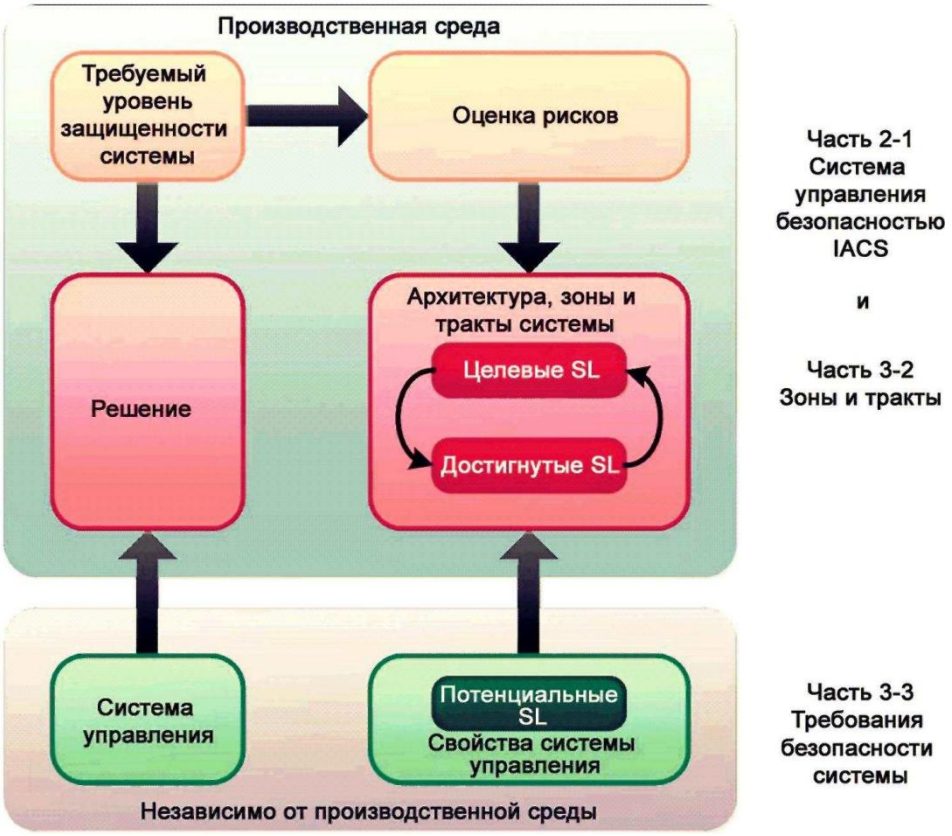



Рисунок 3.2.12. Обеспечение информационной безопасности системы[288]

В системе, согласно стандарту, должны быть достигнуты и соблюдаться семь фундаментальных требований (FR) к уровням безопасности:

[288] Национальный стандарт Российской Федерации : сети коммуникационные промышленные : защищенность (кибербезопасность) сети и системы : часть 1-1 : Терминология, концептуальные положения и модели [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/1200114169 (дата обращения: 17.11.2025).

1) идентификация и аутентификация, контроль доступа пользователей и устройств;

2) контроль использования, авторизация и управление правами доступа;

3) целостность системы, защита от несанкционированных изменений;

4) конфиденциальность данных, защита информации от несанкционированного доступа;

5) ограниченный поток данных, контроль и фильтрация сетевого трафика;

6) своевременное реагирование на события, мониторинг и обнаружение инцидентов безопасности;

7) доступность ресурсов, обеспечение непрерывности работы системы.

Исходя из общих подходов, представленных в стандартах информационной безопасности для предприятий, в настоящее время формируется новая отрасль безопасности промышленных систем. Пока не разработано общих практик, подходов, тест-сетов, как в обычных антивирусах. Антивирусные программы, разработанные ведущими на рынке компаниями, сравниваются на основе показателей, полученных при моделировании хакерской атаки на объект. Кроме того, не сформирован единый подход к защите: обеспечивать защиту конечных устройств или защиту трафика. Еще одной общей проблемой в области безопасности на производстве является устаревание технологий промышленной автоматизации, использование устаревших протоколов и неустойчивость к вирусам, даже давно известным.

Ведущие отечественные компании в области информационной безопасности готовят свои продукты, исходя из предположения, что на промышленном предприятии главное не утечка данных, а непрерывность и безопасность производственных процессов. Следовательно, надо вести непрерывный мониторинг сетевой активности системы управления и автоматизации на производстве и выявлять нетипичную активность в трафике, например, появление пакетов данных для определенных IP-адресов. Такие процессы могут свидетельствовать о стороннем вмешательстве или слежкой за технологическими процессами.

Типовых решений для промышленных предприятий не существует. Поставщикам программного обеспечения приходится подстраиваться под оборудование и системы автоматизации производства, имеющиеся на предприятии. Даже на двух нефтедобывающих месторождениях системы информационной безопасности будут построены по-своему, так как каждое из них было автоматизировано в разное время и находится на разном уровне автоматизации. Какие-то месторождения были автоматизированы 20 лет назад, другие разрабатываются и автоматизируются в настоящее время. Подход к информационной безопасности, виды хакерских атак за это время сильно изменились. Кроме того, на предприятиях, автоматизированных давно, оборудование менялось, дополнялось и все компоненты единой системы находятся на разном уровне информационной зрелости. Например, могут шифроваться каналы, тогда, в соответствии с ГОСТ Р МЭК 62443, приходится ставить дополнительное оборудование для дешифрования канала и достижения целевого уровня безопасности.

Однако уже сформированы подходы к построению информационной безопасности для предприятий со схожей спецификой и работающих на схожем оборудовании. Поставщики оборудования, систем автоматизации и систем информационной безопасности работают в нашей стране в тесном взаимодействии, чтобы синхронизировать работу, создать систему на предприятии, соответствующую необходимому уровню автоматизации и целевым уровням безопасности, а также не воспринимающих работу друг друга, как нетипичный трафик. Распространенной практикой стало построение копии систем предприятия у поставщика программного обеспечения. Это делается для того, чтобы отработать различные варианты атак и конфигурацию систем защиты. Для этого нужно взаимодействие производителей оборудования, системы автоматизации и компании-поставщика антивируса. Такой подход позволяет отработать различные гипотезы и может быть перестроен под решение различных задач в контуре одного проекта и для проектов разных заказчиков.

Под реализацию каждого конкретного проекта собирается своя команда, обладающая необходимыми для ее решения знаниями. Проекты обычно реализуются двухнедельными спринтами с запланированными встречами с руководством и заказчиками для максимального ускорения и визуализации проекта. Внедряется на производство система по принципу agile. Это означает, что система защиты поэтапно устанавливается на различные узлы общей большой системы. Такой подход позволяет не останавливать производство и распределять затраты на ее установку.

Большим вызовом для нашей страны стали санкции на высокотехнологичное оборудование и программное обеспечение. Однако, это дало мощный толчок для развития собственного оборудования и программных решений, которые можно разрабатывать в постоянном контакте, а не подстраиваться под продукцию крупных зарубежных производителей. Продукты информационной защиты, например, перешли на систему Linux, в которой легче конфигурировать разные сети и нет проблем с продлением лицензии Windows.

### 3.3. Создание цифрового двойника университета

Концепция «Управления знаниями» появилась в 1999 году, когда стала очевидна необходимость создания цифровой копии физического объекта инфраструктуры. При этом, чем реалистичнее отображается объект в цифровом пространстве, тем активнее будут использоваться цифровые модели при строительстве и управлении зданиями и сооружениями. В результате, уже в нулевых годах появились программы объемного (3Д) проектирования объектов. 3Д проекты получили широкое распространение, когда в них появилась возможность сценарного анализа, включая сценарии демонтажа и переноса на новые площадки. Такие решения дают бизнесу преимущества в конкурентной борьбе. Ключевым аспектом в этом подходе является сокращение издержек. Когда реализуемый проект требует создания плана демонтажа и очередного монтажа, цифровая копия помогает создать план-график монтажных работ. Составление такого графика позволяет рассчитать ценообразование проекта и определить необходимые

требования к исполнителям монтажных работ. Внедрение общей практики 3Д проектов зданий с планами монтажных и демонтажных работ позволило минимизировать риски строительства, сократить издержки, обосновать окупаемость инвестиций. Это основа создания ценности информационных моделей зданий — технологий "BIM". Такая информационная модель должна генерировать графики монтажа и демонтажа на основе типовых технологических решений, именно такой подход позволяет рассчитать стоимость, сроки строительства и компетенции персонала.

Строительная индустрия является одной из самых консервативных. По данным исследования, проведенного McKinsey Global Institute, ежегодный рост производительности труда в отрасли с начала века в среднем составлял всего 1% в год. Для сравнения, тот же показатель в обрабатывающей промышленности составил 3,6% в год.[289] Цифровые двойники изменили положение в отрасли.

Цифровые двойники демонстрируют выдающиеся показатели оптимизации бизнес-процессов на всех этапах строительства и жизненного цикла эксплуатации зданий. Dodge Data & Analytics совместно с Autodesk провели исследования показателей оптимизации жизненного цикла объекта на разных этапах. Согласно полученным данным, снижение капитальных затрат на строительство составляет 10–15%. Достигается показатель за счет превентивного обнаружения коллизий и ошибок проектирования на ранних этапах. Сроки реализации проектов в среднем сокращаются на 7–12%. Это обусловлено улучшением координации подрядных организаций и оптимизацией логистики. Операционные расходы сокращаются на 15–25% на этапе эксплуатации за счет предиктивного обслуживания и интеллектуального управления энергопотреблением. Снижение затрат на капитальный ремонт достигает 20–30%, благодаря моделированию износа конструкций и прогнозирования необходимости замены элементов. Средняя

[289] Filipe, B.Reinventing construction: a route to higher productivity / Filipe Barbosa, Jonathan Woetzel, Jan Mischke, Maria Joao Ribeirinho, Mukund Sridhar, Matthew Parsons, Nick Berthram, Stephanie Brown // McKinsey Global Institute, February 2017.

экономия энергии при применении технологии цифровых двойников в эксплуатации зданий и сооружений составила 18%.[290]

В среднем, на эксплуатацию приходится до 80% всех затрат.[291] Именно на этом этапе жизненного цикла цифровые двойники дают наибольший экономический эффект. Исследования компании Arup, основанные на опыте внедрения цифровых двойников для моделирования полного жизненного цикла инфраструктурного объекта, показали, что технология помогает снизить полную стоимость жизненного цикла объекта на 20-35%.[292]

Традиционные парадигмы технической эксплуатации зданий и сооружений, базирующиеся на реактивном подходе («починка по факту отказа») или плановом обслуживании (регламентные работы), демонстрируют недостаточную эффективность. Внедрение концепции цифровых двойников позволяет осуществить переход к предиктивной модели обслуживания, основанной на непрерывном мониторинге и прогнозировании состояния.

Технологическая основа предиктивного обслуживания включает встроенные в конструкционные элементы IoT-датчики, обеспечивающие перманентную передачу телеметрии (деформации, вибрационные характеристики, температурно-влажностный режим). Алгоритмы машинного обучения анализируют поступающие потоки данных в реальном времени, выявляя скрытые паттерны и ранние признаки усталости материалов или конструктивных отклонений, предшествующие критическому разрушению.

Применение систем предиктивного мониторинга на основе цифровых двойников показывает высокую экономическую эффективность. В частности, компания Siemens при реализации проектов мониторинга мостовых сооружений и тоннелей в Германии зафиксировала снижение количества аварийных ремонтов на

---

[290] "Digital Twins in Construction: SmartMarket Report", Dodge Data & Analytics и Autodesk, 2021 [Электронный ресурс]. – URL: https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/pdfs/aec-smart-market-report-2021-bim-digital-transformation-en.pdf (дата обращения: 20.04.2026).

[291] Michael P. Gallaher и др. "Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry" National Institute of Standards and Technology (NIST), 2004

[292] Volker Buscher, Léan Doody / "Digital Twin: Towards a Meaningful Framework"// Arup, 2019..

40%, а средний срок службы конструкций увеличился на 15%.[293] Аналогичное исследование WSP Global, проведенное для высотных сооружений в Юго-Восточной Азии, продемонстрировало снижение затрат на внеплановые ремонты на 25%.[294]

Особую актуальность предиктивный подход имеет для критической инфраструктуры (мосты, тоннели), где внезапное разрушение сопряжено с катастрофическими последствиями. Компания Balfour Beatty использует цифровые двойники для мониторинга сети из 1200 мостов в Великобритании, что позволило перейти от планового обслуживания к управлению техническим состоянием, обеспечив экономию в размере 15 млн фунтов в год.[295]

Исследование, проведенное Autodesk совместно с Университетом Кембриджа, показало, что интеграция не менее пяти различных типов сенсорных данных в цифровой двойник здания повышает точность прогнозов остаточного ресурса конструкций до 92%.[296] В то же время, использование исключительно BIM-модели без привязки к данным реального времени (телеметрии) снижает точность прогнозирования до 60%.

В Российской Федерации наблюдается активная динамика внедрения технологий информационного моделирования в строительной отрасли, охватывающая на текущий момент около 40% застройщиков. Данный показатель демонстрирует двукратный рост по сравнению с началом 2024 года. Применение технологии информационного моделирования и цифровых двойников позволило

---

[293] "Predictive Maintenance for Infrastructure Using Digital Twins", 2021, Siemens Smart Infrastructure Division [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950584922001331(дата обращения: 20.04.2026 год).

[294] "Digital Twins for High-Rise Building Management in Southeast Asia" /WSP Global,,2022[Электронный ресурс]. – URL: https://www.wsp.com/en-gl/hubs/lifecycle-digital-twins#:~:text=Turn%20complex%20data%20into%20actionable,making%20across%20their%20entire%20lifecycle (дата обращения: 20.04.2026 год).

[295] "Smart Bridges: Condition-Based Maintenance Using Digital Twins"/ Balfour Beatty [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/392330895_Smart_Structural_Monitoring_Real-Time_Bridge_Response_Using_Digital_Twins_and_Inverse_Analysis (дата обращения: 20.04.2026 год).

[296] Ioannis Brilakis, Ajith Parlikad, "Data Integration for Predictive Digital Twins in Construction", Autodesk & University of Cambridge, 2022

сократить сроки возведения крупных объектов в Москве в среднем на треть. Например, применение цифрового двойника при проектировании пешеходного моста через Мневниковскую пойму сократило этап выбора оптимального участка на 20%. Инновационный кластер «Ломоносов» был спроектирован и построен всего за 2 года вместо стандартных 3–4 лет.[297]

В настоящее время в России происходит активная трансформация строительной отрасли. Одним из приоритетных направлений цифровизации здесь является создание цифровых двойников зданий[298]. Внедрение цифровых технологий в строительную отрасль в России происходит в рамках Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства до 2030 года с прогнозом до 2035 года, зафиксированной в распоряжении Правительства РФ от 31.10.2022 № 3268-р.[299] Стратегия предполагает реализацию в несколько этапов: до 2024 года, с 2024 по 2030 год и с 2030 до 2035 год. Еще одним основополагающим документом является распоряжение Правительства РФ №3883-р от 27.12.2021 года[300], в котором обозначены задачи, которые должны быть решены для цифровизации строительной отрасли. Это, прежде всего, повышение цифровой зрелости; внедрение информационных технологий на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства и цифровая трансформация процессов и услуг.

Под цифровизацией строительной отрасли, в связи с этим, предполагается внедрение технологий информационного моделирования (далее ТИМ или BIM). Однако, процессу широкого применения новых технологий мешает ряд факторов. Среди основных, неготовность к взаимодействию заказчиков, инвесторов, поставщиков и других заинтересованных сторон через прозрачную систему

---

[297] Скандал городского строительства: секрет сверхбыстрого строительства Москвы в цифре [Электронный ресурс]. – URL: https://moscow.allestate.pro/news/12.07.2025/skandal-gorodskogo-stroitelstva-sekret-sverhbystrogo-stroitelstva-moskvy-v-cifre (дата обращения: 20.04.2026 года).

[298] Синицын С.Н. Необходимость создания цифровых двойников в России / С.Н. Синицын // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2024. — Т. 1, № 3(144). — С. 77–84.

[299] Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 N 3268-р [Электронный ресурс]. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202211020032 (дата обращения: 01.10.2025).

[300] Распоряжение Правительства РФ № 3883-р от 27.12.2021 [Электронный ресурс]. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112290003 (дата обращения: 01.10.2025).

информационной модели, создающую препятствия для работы привычных договорных схем. К этому добавляется сопротивление рядовых сотрудников и управленцев на местах, их приверженность традиционным методам проектирования, строительства и эксплуатации объектов. Нехватка и высокая стоимость труда специалистов в области разработки и применения ТИМ-технологий. Незрелость системы государственного регулирования, недостаточная проработка нормативной базы и стандартов, разрозненность и разные уровни зрелости систем ТИМ[301].

Рассмотрим эти факторы подробнее.

За рубежом нормативно-правовая база для применения BIM при строительстве и эксплуатации объектов была сформирована еще в нулевых годах, что стало базой для активного распространения технологии. В России активно использовать технологию начали московские застройщики около пятнадцати лет назад. В Градостроительном кодексе термин «информационные модели» стал применяться только в 2019 году. Очевидно сильное отставание формирования отечественной нормативной базы.

Для внедрения стандартов информационного моделирования в строительной отрасли были приняты следующие нормативные акты:

– Федеральный закон № 190-ФЗ от 29.12.2004 «Градостроительный кодекс РФ»;

– Восемь постановлений и распоряжений Правительства РФ;

– Пять приказов Министерства строительства РФ;

– Семнадцать ГОСТов;

– Восемь сводов правил.

[301] Результаты исследования проблем внедрения технологий информационного моделирования в инвестиционно-строительных проектах российских компаний [Электронный ресурс]. — URL: https://mgsu.ru/news/2022/Otchet_rez_issled_problem_TIM.pdf (дата обращения: 01.10.2025).

Прежде всего это: СП 328.1325800.2020[302] и СП 333.1325800.2020[303]; ГОСТ Р 10.00.00.00–2023 «Единая система информационного моделирования. Основные положения»[304]; ГОСТ Р 10.0.02-2019 «XML-схемы в качестве элемента информационной модели»[305]; постановления Правительства РФ № 331[306] и № 2357;[307] № 1431[308].

Помимо этого, градостроительный кодекс РФ (ГрК РФ т. 57.6, ред. от 03.02.2023) содержит Классификатор строительной информации (КСИ)[309]. Применение этого классификатора является обязательным при внедрении информационных моделей. Кроме того, Минстрой утвердил ряд схем информационных моделей и требований к оформлению электронных документов.

---

[302] СП 328.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели» [Электронный ресурс] // Минстрой. — URL: https://minstroyrf.gov.ru/docs/16400/ (дата обращения: 01.10.2025).

[303] СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла» [Электронный ресурс]. — URL: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&baseC=101&RegNum=54&DocOnPageCount=15&page=11&id=240318 (дата обращения: 01.10.2025).

[304] ГОСТ Р 10.00.00.00-2023 Единая система информационного моделирования. Основные положения [Электронный ресурс] // Росстандарт. — 2023. — URL: https://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=0&month=6&year=2023&search=&id=252825 (дата обращения: 12.11.2025).

[305] ГОСТ Р 10.0.02-2019 Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства. Часть 1. Схема данных [Электронный ресурс] // Росстандарт. — 2019. — URL: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=233070 (дата обращения: 12.11.2025).

[306] Постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2021 № 331 «Об установлении случая, при котором застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства» [Электронный ресурс]. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103100026 (дата обращения: 12.11.2025).

[307] Постановление Правительства Российской Федерации от 20 декабря 2022 г. № 2357 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 5 марта 2021 г. № 331» [Электронный ресурс]. — URL: http://static.government.ru/media/files/Uh2AYAp9DmB4qyCJhPHDAlLH6ataFYI6.pdf (дата обращения: 12.11.2025).

[308] Постановление Правительства Российской Федерации от 17.08.2022 № 1431 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208230042 (дата обращения: 12.11.2025).

[309] Информационное сообщение Классификатор строительной информации [Электронный ресурс] // КСИ. — URL: http://ksi.faufcc.ru/ (дата обращения: 12.11.2025).

Однако уже в 2023 году выявились противоречия в вышеуказанных требованиях об обязанностях применения информационных моделей на стадии проектирования, строительства и эксплуатации. На практике, перечень документов, включаемых в состав информационной модели, определяется заказчиком. Следовательно, правила взаимодействия в информационной среде, формат электронных документов, формирование среды общих данных определяются заказчиком. От уровня его компетентности и заинтересованности в этом вопросе зависит успех реализации проекта, что ставит под сомнение ведущую роль Минстроя в цифровизации строительной отрасли.

Необходимость унификации применяемых цифровых информационных моделей отражена в пояснительной записке к проекту ПП № 1431. Однако, на практике, существуют значительные разночтения в определении и понимании цифровых информационных моделей в действующих нормативно-технических документах. Поэтому для создания Единой системы информационного моделирования в строительстве (ЕСИМ), прежде всего, следует уточнить понятия и определения цифровых информационных моделей.

Предполагается, что в итоговую Единую систему информационного моделирования войдут 19 ГОСТов. В 2023 для публичного обсуждения били размещены три стандарта: ГОСТ Р «Единая система информационного моделирования. Термины и определения», ГОСТ Р «Единая система информационного моделирования. Принципы, цели и задачи», ГОСТ Р «Единая система информационного моделирования. Жизненный цикл объекта моделирования и информационной модели. Общие положения». Эти проекты получили более тысячи замечаний. Такой результат говорит о несогласованности и непонимании цифровой трансформации бизнес-процессов строительной области как со стороны законодательной власти, так и со стороны бизнес-сообщества. Со стороны государственного регулирования в сфере ТИМ пока все сводится к предоставлению бизнесом документов и отчетностей в машиночитаемых форматах, ведение реестров и хранении их в государственных информационных градостроительных системах.

По мнению автора диссертационного исследования, законодательная база нормативно-технического регулирования внедрения ТИМ нуждается в серьезной доработке и формировании единой, понятной, общедоступной системы нормативно-правовых документов, устанавливающих требования к разработке, строительству и эксплуатации зданий с применением ТИМ. В настоящее время избыточность нормативно-правовой базы существенно усложняет процесс цифровой трансформации в строительстве и управлении комплексами зданий.[310]

Для эффективной эксплуатации и управления стоимостью недвижимости проектные информационные модели, разработанные с целью строительства объекта недвижимости, избыточны. В свою очередь, основной фокус внимания застройщиков нацелен на отслеживание хода строительства, а не на подготовку эксплуатационной модели.

МГИМО как опытный эксплуатант множества объектов недвижимости заинтересован в совместной разработке:

1. Системы стандартов эксплуатационной информационной модели зданий.

2. Требований к информационным моделям, предоставляемым на этапе ввода в эксплуатацию.

3. Мер по адаптации отечественных стандартов к международной деятельности в области девелопмента.

Для этого была подана заявка на участие представителей МГИМО в Техническом комитете по стандартизации «Информационное моделирование».

Наличие действенной системы стандартов эксплуатационной информационной модели позволит сформировать обоснованный набор требований к составу информационной модели здания, размещаемой в государственных системах при вводе в эксплуатацию в части эксплуатационных разделов. А также устранить технологический разрыв между высоким уровнем подготовки проектных моделей и низким уровнем предоставляемых материалов при вводе в эксплуатацию.

---

[310] Отчет НИУ МГСУ «Цифровизация строительной отрасли на всех этапах жизненного цикла ОКС» от 25.04.2022 [Электронный ресурс]. — URL: https://digital-build.ru/wp-content/uploads/2022/07/13029866.179299560164735928.1.2-1.pdf (дата обращения: 01.10.2025).

Несмотря на эти препятствия, наблюдается активное использование ТИМ в проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. Это определяется преимуществами, которые получает бизнес при использовании ТИМ.

Вторая проблема на пути цифровизации строительной отрасли — неприятие руководства, сотрудников и контрагентов новых систем проектирования и коммуникации.

Цифровизация компании начинается с осознания руководства неэффективности своего бизнеса и возможностей оптимизации процессов, сокращения издержек, роста производительности, улучшения систем контроля за счет цифровизации. Начинать следует с выявления наиболее проблемных участков в работе и фиксировании личной ответственности за модернизацию процессов на каждом уровне.

Отдельным пунктом здесь является мотивация сотрудников. Их незаинтересованность в происходящих переменах может стать непреодолимым препятствием в цифровой трансформации компании, а строительство и управление зданиями можно отнести к консервативным сферам деятельности.

Для сотрудников компании любые изменения являются стрессовой ситуацией, страх потери рабочего места сопровождал все этапы технического прогресса. Даже потенциальное снижение нагрузки за счет перенос рутинных процессов в программу может вызвать недоверие и сопротивление членов коллектива.

В принятии на местах изменений многое зависит от руководителя. Существует методика последовательного управления изменениями. Она сводится к трем последовательным действиям или шагам.

На первом этапе следует провести работу с теми сотрудниками, которые лояльны решениям руководства по поводу модернизации рабочих процессов. При этом следует опираться на сотрудников, которые не только быстро загорелись идеей, но и готовы к долгой работе по внедрению новых технологий. За тем следует минимизировать влияние на коллектив сотрудников, категорически не принимающих изменения. Только после этого можно переходить к работе с изначально инертной группой сотрудников. Эта группа будет ориентироваться на

первую команду, получившую преимущества от цифровой трансформации их работы.

Поскольку процесс цифровой трансформации можно проводить постепенно, по принципу agile, то, например, можно сначала показать инженерному отделу выгоду от экономии времени при выборе поставщиков. Платформенный принцип работы дает всем зарегистрированным участникам доступ к системе. Соответственно одна команда может размещать заказ, а поставщики делать свои предложения. Аналогично, юристам на их уровне платформы доступны документы контрагентов и их реквизиты, причем они подготовлены и структурированы для быстрой подготовки договоров. Принцип постепенного внедрения цифровых технологий позволит заменить привычные Excel и почту на работу в учетных системах, а плоские чертежи — на более наглядные и удобные в работе трехмерные проекты. На каждом этапе внедрения обязательно пояснять коллективу, зачем производится то или иное изменение.

Немаловажным критерием, не упомянутым ранее, является наличие ресурсов у компании, проводящей цифровизацию процессов и внедряющей ТИМ-системы. Цифровая трансформация является дорогим процессом. Помимо самого программного обеспечения, надо учесть расходы на экспертов, которые будут заниматься внедрением в компании ТИМ-системы, затраты на обучение персонала и другие. Экономический эффект носит отложенный характер.

Опыт организаций, проводящих цифровую трансформацию в компаниях, показывает, что основные проблемы внедрения связаны вовсе не с подключением ТИМ-системы, а с плохо отлаженной системой коммуникации и управления процессами. Руководству следует принять решение об оптимизации бизнес-процессов, частью которой станет переход на ТИМ-систему, и неуклонно следовать к своей цели. Иначе, только внедрением информационной системы все не наладить.

Перейдем к более конкретным задачам цифровизации строительной отрасли в общем, и цифровизации комплекса зданий университета в частности.

Стоит отметить, что понимать технологии информационного моделирования (ТИМ) можно двояко. Предполагалось, что русская аббревиатура будет соответствовать технологии Building Information Modeling (BIM). Однако под ТИМ можно понимать и XML-таблицы, сопровождающие обычные чертежи. BIM-технологии подразумевают под собой создание трехмерных моделей. Именно эти технологии автор рассматривает в своем исследовании. Цифровизация строительства и управления здания начинается с перехода на BIM-технологии. BIM позволяет упростить практически все бизнес-процессы, снизить издержки и количество ошибок, проводить качественный анализ исходных данных. Технологии BIM применяются во всем мире. По сути BIM — специальное программное обеспечение, позволяющее осуществлять проектирование, строительство и управление объектами. Таким образом BIM может быть и процессом проектирования и строительства, и самой моделью реализованного объекта. В России для обозначения процесса применяется понятия технологии информационного моделирования, а для готовой трехмерной работы используется аббревиатура ЦИМ или цифровая информационная модель (см. рис. 3.3.1).



Рисунок 3.3.1. BIM — технологии в жизненном цикле объекта[311]

BIM — является трехмерной моделью здания, в которую интегрирована вся информация о нем, в которой отображен весь жизненный цикл объекта, от проектирования и строительства до демонтажа. Это цифровая копия здания, которая создается и управляется с помощью специального программного обеспечения. Готовая ЦИМ дает возможность собирать данные о объекте управления, анализировать их, а также визуализировать элементы объекта виде 3Д-моделей. Для элементов и узлов информационная модель предоставляет возможности тестирования, от вариантов комплектации и закупки до поведения в эксплуатации.




Рисунок 3.3.2. BIM — технологии в жизненном цикле объекта[312]

ЦИМ позволяет составлять сметы, проектную документацию, план строительства, рассчитывать элементы и узлы будущего объекта, управлять строительством объекта, сопоставлять реальные результаты с планом, принимать обоснованные решения на основе анализа полученных данных, осуществлять эксплуатацию возведенного объекта, ремонт, реконструкцию и демонтаж. То есть предоставляет мощный инструмент управления зданием на всех этапах его

---

311 Бойчев В.А. ТИМ в проектном управлении строительства. Как технологии информационного моделирования помогут цифровой трансформации строительства : цикл лекций / В.А. Бойчев, Г.Ф. Щербина. — Санкт-Петербург : Феникс, 2024. — 95 с.

312 Бойчев В.А. ТИМ в проектном управлении строительства. Как технологии информационного моделирования помогут цифровой трансформации строительства : цикл лекций / В.А. Бойчев, Г.Ф. Щербина. — Санкт-Петербург : Феникс, 2024. — 95 с.

жизненного цикла. Информационные модели позволяют консолидировать разрозненные данные о частях объекта и предоставлять доступ сотрудникам к необходимой для их работы информации.

*Алгоритм создания информационной модели существующего здания*

Процесс создания информационной модели можно разбить на следующие этапы:

1. Формирование запроса на создание информационной модели объекта;
2. Формирование информационных требований (Employer’s Information Requirements, EIR);
3. Разработка плана реализации проекта (BIM Execution Plan);
4. Исполнение предпроекта;
5. Исполнение конструкторских работ;
6. Исполнение проектных работ;
7. Согласование проекта в различных инстанциях;
8. Разработка рабочей документации;
9. Финальная сдача информационной модели в эксплуатацию;
10. Эксплуатация и актуализация модели в течении всего жизненного цикла объекта;
11. Архивирование модели.

По итогу заказчик должен получить 3Д-модель своего объекта, наполненную информацией о каждом его узле, в точности соответствующей реальному объекту и получающей данные от него. От качества составления требований к информационной модели на начальном этапе будет напрямую зависеть полученный результат.

В плане реализации проекта (Execution Plan) прописываются: порядок взаимодействия разработчиков, инженеров, архитекторов; использование определенного программного обеспечения и его совместимости с внутренними системами и форматами организации заказчика (в нашем случае МГИМО).

Весть сложный и многообразный процесс создания информационной модели можно разделить на несколько мега этапов. Первый — создание архитектурной 3Д

модели объекта. Эта модель включает все несущие конструкции и архитектурные элементы, стены, кровлю, фасад коммуникации и инженерные сети. Это своеобразная болванка, которая будет наполняться всеми необходимыми данными и элементами.

На следующем этапе эта модель загружается в специальное программное обеспечение. Это ПО осуществляет расчет всех инженерных сетей и элементов конструкции. На данном этапе создается конструкционный макет сооружения, учитывающий различные спецификации, такие как нормы энергопотребления, освещенности, теплопотерь и т.д.

На следующем этапе модель дополняется данными, структурированными по группам, например, технологические, экономические. Такой информации очень много. Она включает эксплуатационные характеристики, технические характеристики, сроки профилактики и замены и многое другое.

На заключительном этапе производится контроль и анализ полученной информационной модели и всей документации. Модель должна максимально соответствовать характеристикам и параметрам реального объекта. На этом этапе в работе участвуют как представители заказчика, так и ответственные за ввод модели проектировщики. Модель проходит автоматическую проверку и отладку.

Применение технологии информационного моделирования дает множество преимуществ. Она позволяет вести одновременную работу в среде общих данных (СОД) различным специалистам. Сами данные обновляются и актуализируются автоматически. Файлы не дублируются, нет проблемы устаревших данных. Таким образом, все участвующие в управлении зданием сотрудники работают с одной информационной базой и коммуницируют в среде, что делает их взаимодействие прозрачным, быстрым и эффективным. Информационная модель, реализованная на объекте, позволяет видеть всю необходимую техническую документацию и текущую информацию непосредственно на элементах модели, что значительно сокращает время принятия решений, затраты на обслуживание, количество поломок ввиду своевременной профилактики и обслуживания. Кроме того, дает возможность принимать заявки о неполадках на эксплуатируемом объекте в

различных форматах (текст, фото, видео) с привязкой к определенному объекту, с указанием его местоположения.

Возвращаясь к теме безопасности, широко освященной во втором параграфе данной главы, следует отметить, что программных решений, позволяющих реализовать информационную модель в строительстве и/или управлении объектом инфраструктуры довольно много. До сих пор российскими компаниями применяются продукты зарубежных вендоров, покупая лицензии через зарубежные дочерние предприятия или используя другие схемы в обход санкций. Широко используется ПО AUTODESK REVIT, ARCHICAD, Tekla Structures. Tekla BIMsigh, AutoCAD Civil 3D. Аргументы компаний вполне очевидны и понятны. Переход на российское ПО требует колоссальных затрат времени и финансов, а также переобучение персонала и связанное с неприятием новой программы сопротивление коллектива. Однако стоит понимать, что программы неизменно скачивают обновления и передают данные об инфраструктуре в материнскую организацию. Никакой антивирус не сможет защитить в этом случае бизнес от постоянной слежки и возможной диверсии на объекте. Правительство РФ уже рассматривает возможности введения наказания в виде штрафов за использования иностранного ПО, в частности SAP, особенно для проектирования и эксплуатации объектов инфраструктуры, аэропортов, автострад, мостов, железных дорог.[313]

Отечественное программное обеспечение во многом позволяет заменить зарубежное. Renga Architecture позволяет создать информационную модель для комплексного проектирования и управления, причем актуальные библиотеки программы содержат обширные каталоги оборудования и материалов, а генерируемая в программе документация соответствует современным отечественным стандартам. Программное обеспечение NanoCAD предлагает широкие возможности для проектирования и управления инфраструктурных объектов, при этом имеет специализированные приложения: Отопление, электрика

[313] Власти обсудят введение ответственности за отказ от импортозамещения SAP : поможет ли это ускорить переход с зарубежного софта в крупных холдингах [Электронный ресурс]. — URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/04/08/2025/688cb3119a79477c32d51703 (дата обращения: 12.11.2025).

и др. Таким образом, сопоставляя возможные риски и затраты следует выбирать продукты отечественных вендоров.

Далее будут представлены некоторые результаты внедрения цифровой модели в МГИМО для иллюстрации сокращения временных затрат и совершенствования всех бизнес-процессов в университете.

*Цифровая информационная модель МГИМО*

В МГИМО была реализована концепция цифровой информационной копии. Это позволило управлять эксплуатацией и ремонтом собственного комплекса зданий МГИМО, основанного на применении технологии информационного моделирования. Была создана эксплуатационная информационная модель комплекса зданий МГИМО на базе различных источников информации, включая обменные форматы BIM. Создана Система управления объектами недвижимости (СУОН), автоматизирующая все процессы эксплуатации, ремонта, обслуживания и развития объектов недвижимости на базе информационных моделей (см. рис. 3.3.4).




Рисунок 3.3.4. Система управления объектами недвижимости (СУОН) МГИМО[314]

Теперь вся архитектура системы управления имущественным комплексом строится на основе информационной модели. Получить представление о модулях, цифровой модели МГИМО можно по рисунку 3.3.5.

Как видно из рисунка 3.3.5, цифровая информационная модель МГИМО содержит модули: Административный, Технический, Технологическая библиотека, Структура объекта, Строительный продукт и Оперативная модель. Каждый модуль содержит свои библиотеки и встроенные подмодули, отвечающие за свои системы. Функционал системы огромен. Помимо информации о каждом объекте в большом комплексе зданий МГИМО, содержащей всю строительную и эксплуатационную документацию, модель предоставляет возможности преобразования 3Д модели объекта в структуру системы, составление графиков

[314] Презентация «Обоснование заявки МГИМО на участие в Техническом комитете по стандартизации “Информационное моделирование”».

технического обслуживания элементов системы, имеет возможности аварийного оповещения и симулятор, предоставляющий возможности сценарного анализа.

Операционная модель управления построена на базе информационной модели в программном обеспечении. Она потребовала внести изменения в процессы и регламенты работы МГИМО, касающиеся управления имущественным комплексом.

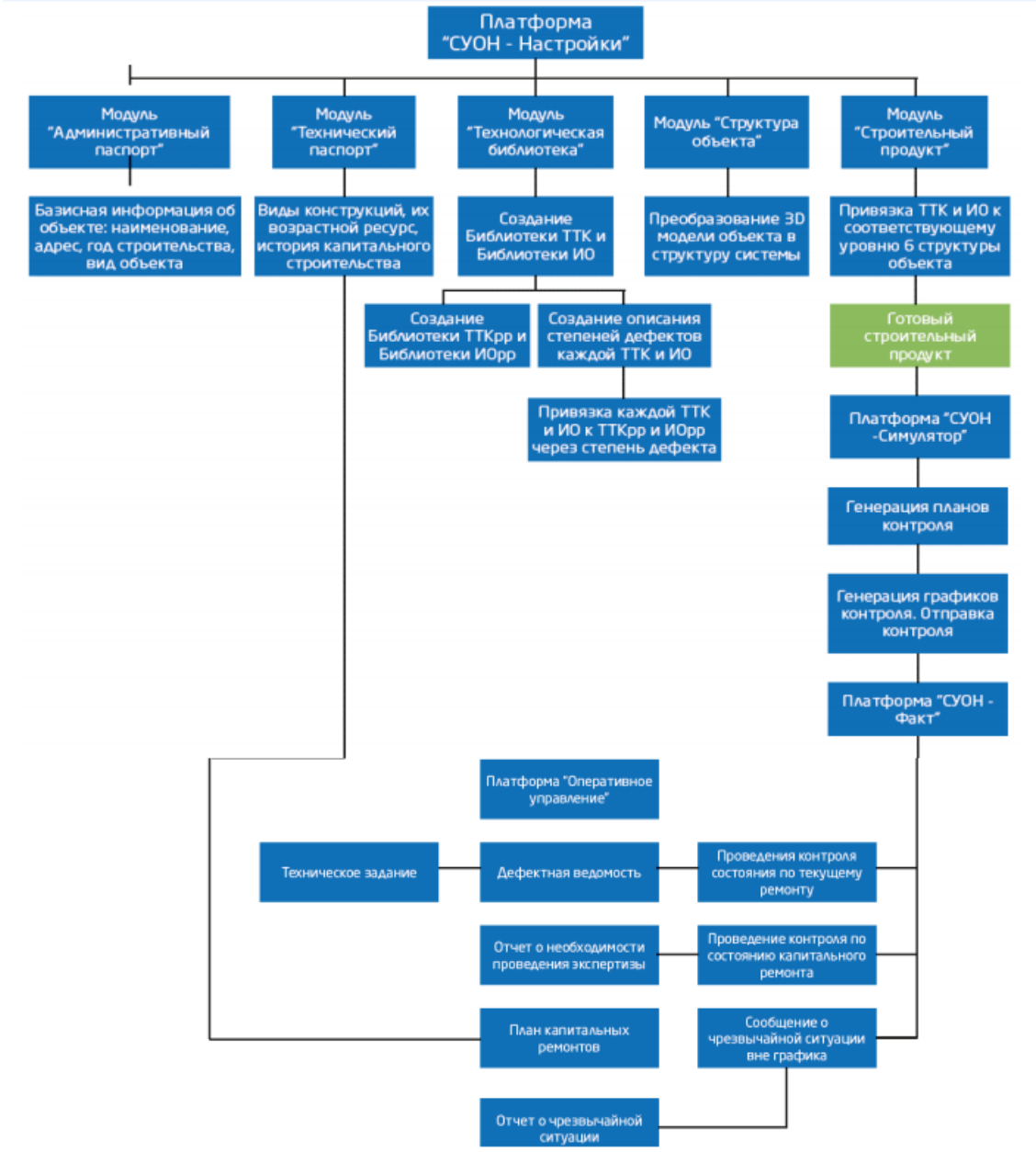



Рисунок 3.3.5. Модули цифровой информационной модели МГИМО[315]

[315] Получен автором на основании данных информационной модели.

Отдельно стоит выделить Встроенная систему дистанционного контроля за дефектами и мобильный терминал техника СУОН. Система дистанционного контроля, построенная на унифицированных алгоритмах фиксации дефектов по технологическим картам. Это позволяет поддерживать виртуальную модель здания в актуальном состоянии (см. рис. 3.3.6). Заявки на выполнение необходимых работ и сигнал о аварии приходят сотрудникам на мобильный терминал техника СУОН, что сокращает время обработки и выполнения заявок.




Рисунок 3.3.6. Встроенная систему дистанционного контроля за дефектами и мобильный терминал техника СУОН[316]

Цифровой двойник здания отличается от цифровой копии промышленного изделия и от так называемой информационной модели здания (BIM — Building information model).

Между привычными в эксплуатации BIM-моделями и цифровым двойником здания существует принципиальная разница. Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию реального объекта. Информационные BIM-модели создаются один раз. Это эксплуатационная модель здания, изменения в нее вносятся при реконструкции или перестройке здания. Такая модель не позволяет

[316] Получен автором на основании данных информационной модели.

хранить динамически меняющиеся данные и моделировать происходящие процессы. Однако в такую модель возможно внести параметры. Это делает оператор. Уже реализованная BIM-модель может являться базой для создания цифровой копии объекта. Уровни трансформации и возможности цифрового двойника здания представлены в таблице 3.3.1

Таблица 3.3.1. Уровни развития цифрового двойника здания[317]

| Уровень | Сложность | Управление | Моделирование процессов | Сценарный анализ |
|---|---|---|---|---|
| Цифровая тень | Виртуальная 3Д модель | Анализ данных, полученных с датчиков в реальном времени | Нет | Нет |
| Цифровой двойник, синхронизированный | Виртуальная 3Д модель с параметрами объекта | Анализ данных, полученных с датчиков в реальном времени на 3Д-модели | Нет | Нет |
| Цифровой двойник, управляемый | Виртуальная 3Д модель с функциями удаленного управления | Анализ данных, полученных с датчиков в реальном времени на 3Д-модели, анализ, сохранение данных, управление процессами удаленно | Да | Нет |
| Цифровой двойник, умный | Виртуальная 3Д модель с функциями удаленного управления с функциями сценарного анадиза | Анализ данных, полученных с датчиков в реальном времени на 3Д-модели, анализ, сохранение данных, управление процессами удаленно, сценарный анализ | Да | Да |

[317] Составлена автором на основании данных сайта Айбим [Электронный ресурс]. — URL: https://bim-info.ru/ (дата обращения: 07.11.2025).

МГИМО стоит именно цифровой двойник и находится в периоде цифровой трансформации, на уровне синхронизированного цифрового двойника, согласно классификации в таблице 3.3.1. Стоит пояснить разницу. Цифровой двойник представляет собой полную цифровую копию существующего объекта, дублирующую не только форму объекта, но и его параметры, показатели приборов и процессы, которые происходят на объекте. Это не просто «болванка», это живой организм, представляющий цифровой близнец реально существующего объекта. При этом цифровой двойник может не повторять форму реального объекта, но в точности дублирует процессы. Цифровая модель может работать с загруженными в нее параметрами, но не считывает их в режиме реального времени, не обладает возможностью симуляции, функционалом «что, если». Именно возможности непрерывного мониторинга параметров объекта, отслеживание аварий, предиктивный анализ, моделирование различных процессов создает огромное конкурентное преимущество цифрового двойника перед обычной информационной моделью.

На базе комплекса зданий МГИМО МИД России был создан цифровой двойник. Инвестиции в проект составили 14,5 млн. руб. (см. таблицу 3.3.2.).

Таблица 3.3.2. Структура инвестиций на создание ЦД МГИМО МИД России

| **Структура инвестиций** | **Инвестиции, тыс. руб.** |
|---|---|
| ПО | 10 000 |
| 3D-модели | 3 000 |
| Обучение персонала | 500 |
| ФОТ | 1 000 |
| Итого: | 14 500 |

*Источник: составлена автором.*

На первоначальном этапе цифровой двойник осуществляет функции автоматизации контроля технического состояния объектов, позволяет управлять ремонтами всех видов (текущий, капитальный, чрезвычайный). Контроль за исполнением работ осуществляется в реальном времени. В базе цифрового двойника МГИМО МИД России содержатся: технологическая библиотека с типовыми картами работ, система отчетности по всем направлениям деятельности.

Финансовая модель реализации проекта цифрового двойника на базе комплекса зданий МГИМО МИД России и ожидаемые финансовые результаты представлены в таблице 3.3.3.

Таблица 3.3.3. Финансовый анализ с учетом инфляции 10%

| Период, год | Коэфф. дисконтирования (учитывается инфляция 10%) | Реальная экономия, % | Годовая номинальная экономия, млн. руб. | | Реальная годовая экономя, млн. руб. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,10 | 100 | Ремонтные работы | 2,5-3 | |
| 3 | 1,331 | 75,1 | Закупки | 1,2-1,5 | 5,7-7,4 |
| 5 | 1,6105 | 62,1 | ФОТ | 0,8-1,0 | 4,7-6,0 |
| 10 | 2,5937 | 38,6 | Предотвращение аварий | 3,1-4,2 | 2,9-3,8 |

*Источник: составлена автором.*

Срок окупаемости проекта составляет всего 1,8-2,4 года.

Высокие финансовые показатели проекта достигаются благодаря оптимизации по четырем основным направлениям: ремонтные работы, закупки, предотвращение аварий, работа персонала (см. таблицу 3.3.4.).

Таблица 3.3.4. Факторы, механизмы экономии и количественные показатели

| **Факторы экономии и механизмы экономии** | **Количественные показатели** |
|---|---|
| Оптимизация ремонтных работ | |
| Автоматизация формирования дефектных ведомостей | Сокращение перерасхода материалов: 15-20% |
| Использование типовых технологических карт | Оптимизация трудозатрат: 25% |
| Точный расчет объемов работ | Снижение стоимости работ: 10-15% |
| Своевременное планирование | Экономия на ремонтах: 2.5-3 млн руб/год |
| Оптимизация закупок | |
| Единая база потребностей | Сокращение запасов: 20-25% |
| Автоматизация формирования заявок | Снижение закупочных цен: 5-7% |
| Контроль остатков | Уменьшение неликвидов: 30% |
| Оптимизация складских запасов | Экономия: 1.2-1.5 млн руб. в год |

*Источник: составлено автором.*

До внедрения технологии в учебном комплексе ежегодно происходило 4-5 крупных аварий, ущерб от каждой оценивается в 8-10 млн. руб. Количество мелких аварий, ущерб от которых оценивается в 30 – 50 тыс. руб., происходило 15-20 ежемесячно. Использование технологии цифровой копии дает возможность проводить предиктивный анализ, что позволило значительно снизить количество аварий обоих типов. Экономия от предотвращения крупных аварий составила 2.7-

3.6 млн. руб. в год, а мелких аварий - 400-600 тыс. руб. в год. Таким образом, общая экономия по этому направлению достигает 3,1-4,2 млн. руб. в год. Реальная экономия в год достигает 7,6-9,7 млн. руб.

Значительная оптимизация наблюдается в работе персонала. Рост производительности труда составил 30%, время формирования отчетности сократилось на 40%. Это позволило оптимизировать штатную численность персонала на 10-15%.

Технология очень хорошо себя показала за несколько лет с начала реализации проекта. Текущий цифровой двойник планируется развивать по следующим основным направлениям:

Расширение предиктивной аналитики

1. автоматизация мобильного контроля;
2. интеграция с системами учета;
3. развитие электронного документооборота;
4. внедрение дополнительных датчиков мониторинга.

Пока цифровой двойник МГИМО представляет собой упрощенную модель, которая считывает показатели с датчиков и управляет инженерными коммуникациями. При этом она уже показала значительные результаты, сократив энергетические потери, время исполнения заявок и многое другое. Если к этому прибавить процессы цифровизации документооборота, составления расписаний курсов, распределение аудиторий, личные кабинеты преподавателей и студентов. Модель имеет гораздо больше возможностей для развития. Например, на уровне организации учебного процесса. Был проведен опрос среди студентов факультета Международного бизнеса. Целью опроса, было составление рейтинга проблем, затрудняющих процесс их обучения в университете. Одной из основных проблем является потеря времени в рутинных процессах и опоздания на занятия. Эти

проблемы можно решить с помощью цифровизации, однако, выявить только с помощью камер и датчиков крайне затруднительно. Поэтому был проведен опрос среду студентов третьего факультетов МБ и МИЭП. Студентам предлагалось выделить три основные проблемы в организации учебного процесса в МГИМО. Результаты представлены на рисунке 3.3.7.




Рисунок 3.3.7. Результаты опроса студентов МГИМО, %[318]

Основными источниками потери времени и причинами опозданий на занятия студенты считают потери времени при входе в здание университета и очереди в гардероб, очереди в столовой и нехватку посадочных мест. Также студенты недовольны электронным расписанием и расположением аудиторий последовательно идущих занятий в разных частях здания.

Решить данные проблемы возможно с помощью дальнейшей цифровой трансформации университета на разном уровне. Проблемы со очередями на входе в здание университета и забытыми пропусками будут решены добавлением функционала прохода по Face ID, то есть по распознаванию лица. Эта функция прекрасно работает в университетах Китая, такая функция реализована в ряде университетов России и Белоруссии. Технология позволяет распознать человека по

[318] Составлено автором по данным опроса, проведенного в телеграм-канале «Экономполитология».

лицу, сопоставив данные с камеры на входе и данными в базе данных. Если лицо совпало, то датчик дает положительный ответ и проход открывается автоматически. Время отклика должно занимать не более трех секунд. Проект находится в высокой степени готовности: на каждом входе в МГИМО стоят камеры, с функцией распознавания лица (пока они измеряют температуру и позволяют проход, если человек здоров), составлена база данных всех студентов, преподавателей и сотрудников университета. Для распознавания лиц используется технология машинного обучения, все личные данные надежного шифруются. Технология будет использовать 2Д распознавание лиц, так как в этом случае надежнее результаты сопоставления данных с фотографиями в базе. При полной реализации проекта ожидается, одновременное распознание до 5 лиц, при точности распознания 99,8%, скорости распознания 1 сек и энергонезависимой базой данных 50 тыс. человек. Это позволит увеличить посещаемость на 7% и повысить уровень безопасности в учебном заведении. Технология также будет применяться в общежитиях университета[319].

Для сокращения времени в гардеробе и минимизации контактов студентов в период распространения острых респираторных заболеваний возможно реализовать технологию «умного гардероба», которая будет добавлена уровнем в цифровой двойник МГИМО. Суть технологии сводится к установке специальной панели в гардеробах университета, которая будет закреплять номер крючка к конкретному студенту. Студент вешает куртку, прикладывает к панели пропуск (есть варианты авторизации по Face ID или по авторизации в приложении университета и прикладыванием телефона через технологию NFC), панель считывает код и связывает его с номером крючка, на котором висят вещи. Технология блокчейн обеспечит высокую надежность и безопасность при таком решении[320]. Подобные технологии реализованы в гардеробах фитнес-центров.

---

[319] УП П-01, команда № 1, Установка оборудования для входа в университет с помощью распознавания лица [Электронный ресурс] // 20.35 Университет. — URL: https://pt.2035.university/project/up-p-01-komanda-no-1 (дата обращения: 07.11.2025).

[320] Умный гардероб [Электронный ресурс] // 20.35 Университет. — URL: https://pt.2035.university/project/umnyj-garderob_2022_04_14_01_11_09 (дата обращения: 07.11.2025).

Реализация такой концепции позволит сократить очереди в гардеробах, уменьшить контакты студентов, сократить расходы университета на сотрудников гардероба.

Проблема очередей в столовой может быть разрешена добавлением в мобильное приложение МГИМО функции онлайн-буфета. Суть такого решения сводится к тому, что студенты делают заказ из меню столовой и оплачивают его в приложении. Сотрудники столовой формируют заказ к указанному времени. Формирование заказа будет происходить во время пар, когда нагрузка на столовую минимальная. В перерыве студент забирает заказ, в соответствии с номером[321].

Проблема с составлением удобного расписания уже во многом решена, благодаря обратной связи от студентов.

Выводы по параграфу можно сделать следующие. Цифровые модели в строительстве активно начали использоваться с начала этого века. В отличии от западных стран, где параллельно с развитием BIM — моделей в строительстве и эксплуатации зданий и сооружений была создана институциональная база, что сильно способствовало широкому распространению технологии, в России до сих пор не создано общей и понятной законодательной основы для широкого использования цифровых двойников. Нет четкого определения цифровых двойников, предполагающих 3Д-модели сооружений, понятия перепутаны. Перечень документов, включаемых в состав информационной модели, определяется заказчиком, а не регламентируется в законодательстве. Это ставит успех проекта в зависимость от уровня компетентности заказчика в этом вопросе.

Автор работы, как человек, непосредственно занимающийся созданием цифрового двойника МГИМО, предлагает создание:

1. Системы стандартов эксплуатационной информационной модели зданий.

2. Требований к информационным моделям, предоставляемым на этапе ввода в эксплуатацию.

3. Мер по адаптации отечественных стандартов к международной деятельности в области девелопмента.

В параграфе были выявлены основные проблемы при цифровой трансформации в управлении зданиями. В том числе, сопротивление сотрудников и их опасения за вои рабочие места. Автором были предложены пути возможного

---

[321] Буфет онлайн [Электронный ресурс] // 20.35 Университет. — URL: https://pt.2035.university/project/bufet-onlajn (дата обращения: 07.11.2025).

решения подобных проблем, в том числе разделение рабочего коллектива на три группы и варианты работы с этими группами. Кроме того, управленческий подход agile, позволяющий постепенно менять привычные подходы к управлению сооружениями.

Реализация проекта цифрового двойника для управления комплексом зданий МГИМО МИД России позволила провести значительную оптимизацию ключевых бизнес-процессов. Благодаря созданию единой информационной базы объектов недвижимости, автоматизации процессов контроля и управления, внедрению системы предиктивной аналитики и формированию цифровой модели технического состояния зданий удалось достичь сокращения операционных расходов на 25-30%, снижения затрат на внеплановые ремонты на 40%, оптимизировать использования ресурсов на 15-20%, уменьшение складские запасы на 20-25%, оптимизировать на 15% штатную численность персонала.

Внедрение цифрового двойника обеспечивает повышение эффективности управления объектами недвижимости, оптимизацию расходов на эксплуатацию, улучшение качества обслуживания зданий, снижение рисков аварийных ситуаций, создание прозрачной системы управления.

Успешный опыт, реализованный в МГИМО МИД России предполагается масштабировать и добавить в цифровой двойник новые объекты. Будут расширены аналитические возможности системы, автоматизированы процессы принятия решений, создана единая платформа управления имуществом.

Однако следует учитывать и управлять рядом рисков, связанных с цифровизацией процесса управления имуществом. Прежде всего необходимость постоянного обновления технической базы и наличие квалифицированного персонала, а также высокие риски информационной безопасности и возможные сбои в работе системы.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе решения первой задачи исследования были выделены основные этапы цифровизации, вызвавшие кардинальные изменением бизнес-процессов: 1) начало (середина XX века), связанное с массовым распространением персональных компьютеров; 2) оптимизация хозяйственной деятельности за счет масштабной оцифровки; 3) массовое распространение интернета в 1980-90-х годах; 4) появление современного понятия «цифровая экономика». Автором рассмотрены разные подходы к понятия цифровой экономики, но за рабочее определение взято то, которое содержится в Стратегии развития информационного общества Российской Федерации на 2017–2030 гг.

При рассмотрении научных трудов, посвященных цифровой трансформации, было установлено, что существует три основных подхода. Часть ученых рассматривает ее как непрерывный процесс, другие связывают ее с появлением «третьей платформы» (облака, Big Data и др.). Внимания заслуживает третья группа ученых, которая рассматривает цифровую трансформацию через призму изменения бизнес-процессов в отдельных компаниях, не только цифровых. Проведенный анализ позволил автору установить отличительные особенности Четвертой промышленной революции от всех предшествующих — это синтез и взаимодействие всех технологических достижений.

Особое внимание было уделено анализу трансформации бизнес-процессов по мере вовлечения компании в цифровую экономику. Автор выделил четыре основных этапа: 1) оценка текущего состояния бизнес-процессов, определение целей и разработка стратегии цифровизации; 2) выбор цифровых технологий и их интеграция в традиционные бизнес-процессы; 3) анализ результатов и их оптимизация; 4) создание дорожной карты цифровой трансформации.

Автором были изучены различные подходы к понятию «цифровая трансформация. Анализ зарубежной и отечественной литературы позволил установить основные принципы цифровой трансформации: 1) взаимодействие разных субъектов и автоматическое принятие решений; 2) использование

реестровой модели; 3) экстерриториальность; 4) проактивность, т.е. способность людей инициировать действия и нести за них ответственность.

Также были определены основные направления, по которым цифровая трансформация влияет на бизнес-процессы. Радикальное повышение эффективности, использование масштабных и гибких технологий, сквозные изменения, затрагивающие все производственные и управленческие процессы и др.

Помимо использования теоретических конструкций автор опирался на опыт ведущих компаний, например, Microsoft и GeneralElectric. Сравнение глобальных тенденций цифровой трансформации с практикой на уровне отдельных компаний позволило автору определить основные стратегические направления цифровизации бизнес-процессов организации. Во-первых, это снижение количества действий для достижения поставленной задачи. Во-вторых, управление данными, которое позволяет разрабатывать модели и прогнозировать поведение клиентов. В-третьих, клиентоориентированность. В-четвертых, постоянный мониторинг, тестирование и использование цифровых решений.

Автором были детально рассмотрены ключевые компоненты цифровой экономики, а именно такие технологии как: искусственный интеллект, большие данные, облачные технологии, интернет вещей и промышленный интернет вещей, блокчейн, 5G, дополненная и виртуальная реальность. Было установлено, что наиболее востребованной бизнесом сегодня являются технологи двойных двойников.

В ходе решения второй задачи автором был произведет детальный анализ подходов к определению технологии цифрового двойника в научной литературе, так и в бизнес-практике. Было установлено, что первое упоминание термина встречается в 2010 году в отчетах NASA, а уже с 2018 года можно говорить о массовом внедрении технологии в различных сферах. Сегодня цифровой двойник состоит из таких компонентов как средства комплексного моделирования и симулирования, средства коммуникации и объединение операционных данных, средства предсказательной аналитики.

Установлено, что определения цифрового двойника варьируются от самого широкого подхода (цифровая копия объекта) до узкого (техническое и технологическое решение). Разнообразие подходов объясняется тем, что компании используют разные по сложности технологии в зависимости от сферы деятельности. Для более детального изучения содержания были рассмотрены такие смежные понятия как «цифровая модель», «цифровая нить», «цифровая тень» и «цифровой клон». Цифровая нить находит причинно-следственные связи. Цифровая тень технология, позволяющая передавать информацию из реального мира в цифровой слой. Цифровой двойник влияет обеспечивает взаимное влияние цифрового и реального объекта. Цифровой клон — глубокое обучение и манипулирование фото, аудио и видеоматериалами. Кроме того, автором были изучены существующие типологии цифровых двойников и была предложена классификация по уровню зрелости, характеру управления и возможности использования машинного обучения: 1) цифровой двойник на стадии проектирования; 2) цифровая тень; 3) синхронизированный цифровой двойник; 4) управляемый (адаптивный) цифровой двойник; умный (интеллектуальный) цифровой двойник.

Проведенный анализ позволил автору сформулировать собственное определение цифрового двойника, учитывающее практическую значимость для бизнес-процессов. *Цифровой двойник — это виртуальная модель (прототип) физического объекта, динамично меняющаяся(ийся) в результате постоянного автоматического обмена данными и информацией между ними благодаря наличию связанной сквозными технологиями многослойной конструкции, предназначенная (ый) для определения и предсказания проблем объекта и моделирования вариантов их решений с целью оптимизации деятельности субъекта.*

Автором был проанализирован опыт внедрения цифровых двойников в разных сферах. Было установлено, что масштабы внедрения этой технологии в бизнес-процессы значительно увеличились за последние годы и продолжают расти. Среди основных причин, побуждающих руководство компании к внедрению технологий следует выделить три основных: необходимость снижения операционных затрат;

возможность масштабировать производственные процессы; обеспечение операционной надежности.

Установлено, что к основным преимуществам технологии цифрового двойника как инструмента совершенствования бизнес-процессов относятся: наследование данных; интеграция удаленных работников; экономия времени принятия решений и разработки новых продуктов; экономия затрат; возможность постоянного мониторинга.

В качестве технологии управления бизнес-процессами цифровые двойники выполняют такие важные функции как: 1) оперативное и малозатратное тестирование актива; 2) обнаружение уязвимостей до запуска проекта; 3) повышение эффективности всех систем; 4) снижение рисков; 5) рост конкурентоспособности; 6) прогнозирование; 7) наиболее полное соответствие ожиданиям клиентов. Доказано, что технология двойных двойников особенно эффективна на предприятиях с длинным циклом, где затруднено техническое обслуживание или требуется высококвалифицированный сервис

Вместе с тем, анализ практики ведущих компаний показал, что внедрение цифровых двойников сопряжено с определенными трудностями. Во-первых, — сложность, затратность и длительность процессов цифровизации. Во-вторых, — риски, связанные с утечкой информации. В-третьих, существует риск создания неадекватно цифровой модели. В-четвертых, отсутствие необходимых навыков и информации у работников и руководства компании. Также можно выделить проблемы, связанные с качеством данных или организационные трудности по внедрению цифровых технологий в привычную систему управления бизнес-процессами.

В ходе решения третьей задачи исследования, а именно сравнения российского и зарубежного опыта внедрения цифровых двойников удалось установить ряд факторов, которые в одинаковой степени влияют на внедрение этой технологии вне зависимости от страны или региона. Так, к факторам, способствующим развитию цифровых двойников, следует отнести обязательное вовлечение бизнеса в выполнение Целей устойчивого развития, введение налога на углеродный след,

постоянную необходимость модернизации технологических процессов. Вместе с тем, повсеместное внедрение технологии тормозится высокой ценой. Экономически целесообразно применять цифровой двойник в системе стоимостью более 150 тысяч евро. К другим сдерживающим факторам, как в России, так и в мире, следует отнести недостаток квалифицированных кадров и нежелание компаний повышать риски потери важной информации. Важно отметить, что в этой ситуации критически важной становится государственная поддержка в любой приемлемой форме.

Если говорить о российском опыте, то мощным стимулом к развитию отечественного программного обеспечения послужил отток зарубежных компаний после 2022 года. Однако еще с 2021 года в России введен национальный стандарт Российской Федерации «Цифровые двойники. Общие технические требования». Также развитие цифровых двойников включено в дорожную карту Национальной технологической инициативы (НТИ). На данный момент на российском рынке цифровых двойников присутствуют как российские, так и зарубежные компании. Среди отечественных компаний можно выделить НИК «Научно-инженерный центр композитов», «СКБ Контур», «Ростелеком» и другие. Одним из лидеров по внедрению технологии в нашей стране является нефтегазовая промышленность. В работе достижения в этой отрасли рассмотрены на примере компании Роснефть.

При анализе тенденций развития цифровых двойников в зарубежных странах были выявлены основные тренды. Среди главных следует отметить увеличение скорости внедрения технологии в промышленность, появление новых облачных сервисов и услуг, рост взаимодействия физического и биологического миров, стратегическое партнерство и слияние с ключевыми поставщиками технологий и др. Рынок цифровых двойников фрагментирован такими крупными игроками, как ANSYS Inc., Cal-Tek SRL, Cityzenith Inc., General Electric Company и IBM Corporation. Игроки на рынке принимают такие стратегии, как партнерство и поглощение, чтобы улучшить свои предложения услуг и получить устойчивое конкурентное преимущество. В настоящее время одной из основных тенденций, формирующей глобальный рынок цифровых двойников, является растущая

интеграция технологий искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения (ML). Новой тенденцией на мировом рынке цифровых двойников является широкое внедрение передовых вычислений, позволяющих в режиме реального времени обрабатывать и анализировать данные, генерируемые цифровыми двойниками.

Далее в работе были рассмотрены отдельные регионы и выявлены ключевые тенденции для каждого из них. Так, рынок Азиатско-Тихоокеанского региона растет впечатляющими темпами — более 40% в год. В основном, рост обеспечивается успехами Китая, Японии и Индии. Наибольшего эффекта от внедрения цифровых удалось добиться по направлению создания умных городов.

В свою очередь, рост европейского рынка цифровых двойников обеспечивается внедрением передовых технологий, таких как IoT, AI и большие данные, а также акцентом на Industry 4.0, умные города и устойчивое развитие. Одним из наиболее динамично развивающихся направлений в Европе является внедрение цифровых двойников в строительный сектор.

Отличительной особенностью рынка цифровых двойников в странах Персидского залива является активное участие правительств в обеспечении условий, необходимых для создания лидерства в IT-области и цифровизации. Во многих странах региона приняты государственные программы по развитию цифровых технологий и искусственного интеллекта. Как и в России, отраслями лидерами являются нефтяная сфера, создание удобного сектора госуслуг, развитие умных городов. Большое внимание уделяется развитию искусственного интеллекта.

В Африке цифровые двойники используются для моделирования растений и сельскохозяйственных животных. Рынок IT-услуг в странах Латинской Америки в настоящее время переживает значительный рост.

Анализ практики имплементации цифровых двойников в бизнес-процессы позволил выявить две главные проблемы, с которыми сталкивается руководство компаний. Во-первых, это отсутствие взаимодействия и стандартизации в различных сферах. Это препятствует реализации главного преимущества любого цифрового двойника — бесперебойной коммуникации и сотрудничества. Для

решения этой проблемы необходимо способствовать созданию интероперабельности.

Во-вторых, главной проблемой остается обеспечение безопасности. Использование технологий цифровых двойников создает угрозы как в реальном, так и в цифровом измерении. Если уже сформирован опыт обеспечения безопасности физических объектов, использующих информационные технологии, то для цифровой копии он не всегда применим. Классическая теория защиты информации оперирует понятиями конфиденциальность, целостность и доступность. Применительно к «цифровым двойникам» можно поставить вопрос об их адекватности реальным исполнительным механизмам либо объектам управления. Поскольку «цифровые двойники», как правило, описывают изменяющиеся объекты, традиционные подходы, связанные, например, с обеспечением целостности, могут быть неприменимы. Дополнительные угрозы могут создавать иностранные государства[322], получив путем хакерских атак доступ к цифровым двойникам в стратегически важных отраслях и посредством их к реальным объектам, поскольку цифровые двойники формируются на иностранных цифровых платформах.

Говоря о рисках для безопасности, необходимо упомянуть намеренные действия иностранных государств, направленные на получение доступа к цифровым двойникам и их к реальным объектам в стратегически важных отраслях путем хакерских атак, поскольку цифровые двойники формируются на иностранных цифровых платформах. Автором детально изучен печальный опыт киберугроз, утечек данных и кражи интеллектуальной собственности в различных странах, в частности, в России, Австрии, Франции, Израиле, ОАЭ, Великобритании и Германии. Установлено, что в России наибольшее количество атак приходится на промышленные предприятия, телекоммуникации, госучреждения и ИТ-компании.

---

[322] Экономика строительства №4/2020 : периодическое издание [Электронный ресурс] / под ред. Е.П. Панкратова — Москва : Русайнс, 2020. — 80 с. — URL: https://book.ru/book/946811 (дата обращения: 24.10.2025).

Четвертой задачей исследования было выделить основные отрасли-лидеры по внедрению цифровых двойников в бизнес-процессы и провести сравнительный анализ достижений и ограничений этого процесса. На основе анализа данных за последние десять лет было установлено, что среди ТОП-6 мировых «лидеров» по выбросам парниковых газов в атмосферу находятся: Китай, США, Индия Бразилия, Россия. Это связано с быстрым индустриальным развитием этих стран и сопутствующим увеличением спроса на электроэнергию.

Было установлено, что основными источниками выбросов газов в атмосферу являются энергетический и промышленный комплексы, транспорт и сельское хозяйство. При этом последние десять лет опережающими темпами растет доля твердых бытовых отходов (ТБО), хотя она и остается самой маленькой среди семи рассмотренных источников выбросов.

Был проанализирован опыт стран по внедрению технологии цифрового двойника в отраслях-«лидерах» по загрязнению. В результате анализа было установлено, что в сфере энергетики лучший опыт накоплен у России и Китая. В сфере обращения с ТБО и очистки сточных — у Китая. В сфере сельского хозяйства у России. Умные города хорошо развиваются в России и Индии.

Однако приходится признать, что сотрудничество стран в этом направлении недостаточно развито. Из крупных проектов на данный момент можно назвать только международное взаимодействие по строительству АЭС. Странам, прежде всего странам БРИКС, необходимо развивать двустороннее и многостороннее сотрудничество в направлении разработки, создания и внедрения технологии цифровых двойников.

Пятая задача — выбрать оптимальные методы внедрения цифровых двойников в бизнес-процессы. Продемонстрировать применимость этих технологий для развития университета. Цифровые двойники, внедренные на производственных комплексах, позволяют находить потери в системе, утечки и оценить их количественно. На основании полученных данных, руководство может принять соответствующие решения. Например, Газпром установил газовую электростанцию на месторождении в Ханты-Мансийском АО и газ, который

раньше сжигался на факелах и загрязнял окружающую среду, используется для производства электричества, питающего все месторождение. Цифровые двойники в строительстве помогают реализовать проекты с минимальной вырубкой деревьев на площадке. Атомные электростанции, системы очистки сточных вод, и мусороперерабатывающие заводы строят с использованием цифровых двойников, создавая системы с максимальной степенью переработки отходов и высочайшими уровнями контроля и безопасности.

Что касается информационной защиты цифровых двойников крупных промышленных комплексов, то уже созданы и реализуются стандарты такой защиты. Каждая система разрабатывается под индивидуальный проект, однако, уже сформированы подходы к построению информационной безопасности для предприятий со схожей спецификой и работающих на схожем оборудовании. В условиях санкций, мы испытываем дефицит оборудования. В этом есть положительный момент, так как поставщики оборудования, систем автоматизации и систем информационной безопасности работают в России в тесном взаимодействии. Это позволяет синхронизировать работу, создать систему на предприятии, соответствующую необходимому уровню автоматизации и целевым уровням безопасности, а также не воспринимающих работу друг друга, как нетипичный трафик.

В ходе выявления возможности применения технологий цифрового двойника в развитии университетов автор продемонстрировал разницу между цифровой информационной моделью здания и цифровым двойником, а также выработал этапы трансформации цифровой модели в цифровой двойник с возможностями симуляции. Цифровой двойник МГИМО в данный момент находится на первой стадии, то есть были созданы 3Д-модели комплекса зданий, на этих моделях отражаются текущие параметры здания, показатели датчиков. Цифровой двойник управляется с помощью системы СУОН. Особенностью системы управления является создание приложения для сотрудников инженерной службы, позволяющего им получать заявки на телефон, включая описание и фотографии

объекта. Система содержит блок сценарного анализа, полный функционал которого реализуется в данное время.

Для дальнейшего расширения функционала цифрового двойника МГИМО путем голосования среди студентов были выявлены основные проблемы, затрудняющие процесс обучения. Согласно опросу, основные потери времени происходят в очередях на входе в университет, гардеробе, столовой. Эти проблемы могут быть решены с помощью входа по Face-ID. Эта функция сейчас реализуется. По прогнозу, ускорение прохода студентов в здание позволит повысить посещаемость на 7%. Функции «умного» гардероба, реализованные в университете и добавление возможности заказа обеда в столовой в мобильное приложение университета позволят решить проблему очередей и распространения респираторных заболеваний.

# БИБЛИОГРАФИЯ

**Нормативные документы**

1. Федеральный закон № 190-ФЗ от 29.12.2004 «Градостроительный кодекс РФ» // СПС Консультант Плюс.

2. Указ Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» // СПС Консультант Плюс.

3. Постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2021 № 331 «Об установлении случая, при котором застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства» [Электронный ресурс]. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103100026 (дата обращения: 07.11.2025).

4. Постановление Правительства Российской Федерации от 17.08.2022 № 1431 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208230042 (дата обращения: 07.11.2025).

5. Постановление Правительства Российской Федерации от 20 декабря 2022 г. № 2357 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 5 марта 2021 г. № 331» [Электронный ресурс]. — URL: http://static.government.ru/media/files/Uh2AYAp9DmB4qyCJhPHDAlLH6ataFYI6.pdf (дата обращения: 07.11.2025).

6. Распоряжение Правительства РФ № 3883-р от 27.12.2021 [Электронный ресурс]. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112290003 (дата обращения: 01.10.2025).

7. Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 N 3268-р [Электронный ресурс]. — URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202211020032 (дата обращения: 01.10.2025).

8. Государственная программа «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» : базовые бюджетные ассигнования на реализацию государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации в 2024–2026 годах» [Электронный ресурс] // СПС Консультант Плюс. — URL: https://sudact.ru/law/metodika-rascheta-predelnykh-bazovykh-biudzhetnykh-assignovanii-federalnogo_2/metodika/2/gosudarstvennaia-programma-nauchno-tekhnologicheskoe-razvitie-rossiiskoi/ (дата обращения: 11.10.2025).

9. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р [Электронный ресурс]. — URL: http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf (дата обращения: 07.11.2025); Цифровая Россия — 2024.

10. Национальный стандарт Российской Федерации : сети коммуникационные промышленные : защищенность (кибербезопасность) сети и системы : часть 1-1 : Терминология, концептуальные положения и модели [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/1200114169 (дата обращения: 17.11.2025).

11. ГОСТ Р 10.0.02-2019 Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства. Часть 1. Схема данных [Электронный ресурс] // Росстандарт. — 2019. — https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=233070 (дата обращения: 07.11.2025).

12. ГОСТ Р 10.00.00.00-2023 Единая система информационного моделирования. Основные положения [Электронный ресурс] // Росстандарт. — 2023. — URL:

https://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=0&month=6&year=2023&search=&id=252825 (дата обращения: 07.11.2025).

13. ГОСТ Р 57700.37-2021 Национальный стандарт Российской Федерации «Компьютерные модели и моделирование цифровые двойники изделий» [Электронный ресурс]. — URL: https://meganorm.ru/Data/758/75810.pdf (дата обращения: 15.10.2025).

**Научная литература на русском языке**

14. Актуальные вопросы декарбонизации : ч. 1 / под науч. ред. М.Х. Салахова, М.С. Тагирова. — Казань : ФЭН, 2021. — 56 с.

15. Бабкин А.В. Цифровая экономика и ее влияние на конкурентоспособность предпринимательских структур / А.В. Бабкин, О.В. Чистякова // Российское предпринимательство. — 2017. — Т. 18. — № 24. — С. 4087–4102.

16. Бевза Д. С атаками хактивистов связано 30 процентов всех киберинцидентов в РФ [Электронный ресурс] // Технологии. — 06.02.2025. — URL: https://rg.ru/2025/02/06/s-atakami-haktivistov-sviazano-30-procentov-vseh-kiberincidentov-v-rf.html (дата обращения: 17.11.2025).

17. Бессарабова А.А., Балязин Н.О. Теоретический базис развития предприятий сервиса в условиях цифровых экосистем [Электронный ресурс] / А.А. Бессарабова, Н.О. Балязин // Прикладные экономические исследования. – 2026. – №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskiy-bazis-razvitiya-predpriyatiy-servisa-v-usloviyah-tsifrovyh-ekosistem (дата обращения: 16.04.2026).

18. Бойчев В.А. ТИМ в проектном управлении строительства. Как технологии информационного моделирования помогут цифровой трансформации строительства : цикл лекций / В.А. Бойчев, Г.Ф. Щербина. — Санкт-Петербург : Феникс, 2024. — 95 с.

19. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства [Электронный ресурс] / Н.В. Курганова и др. // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Vol. 7, no. 5. — P.

105–115. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyh-dvoynikov-kak-odno-iz-klyuchevyh-napravleniy-tsifrovizatsii-proizvodstva?ysclid=luvfkxlsmt157138445 (дата обращения: 06.11.2025).

20. Гасанов Э.С. Оценка развития цифровой экономики в корпоративной предпринимательской среде [Электронный ресурс] / Э.С. Гасанов // Human Progress. – 2022. – №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-razvitiya-tsifrovoy-ekonomiki-v-korporativnoy-predprinimatelskoy-srede (дата обращения: 16.04.2026).

21. Городнова Н.В. Развитие цифровой экономики: теория и практика [Электронный ресурс] / Н.В. Городнова // Вопросы инновационной экономики. – 2021. – №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-tsifrovoy-ekonomiki-teoriya-i-praktika (дата обращения: 16.04.2026).

22. Гостева О.В. Особенности применения цифровых двойников на российских промышленных предприятиях [Электронный ресурс] / О.В. Гостева, О.В. Пацук. — URL: https://research-journal.org/archive/8-134-2023-august/10.23670/IRJ.2023.134.14?ysclid=lvks1tqb6l261026543 (дата обращения: 07.11.2025).

23. Грешонков А. М. Стратегия модернизации сельского хозяйства в условиях перехода к цифровой экономике [Электронный ресурс] / А.М. Грешонков // Организатор производства. – 2022. – №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/strategiya-modernizatsii-selskogo-hozyaystva-v-usloviyah-perehoda-k-tsifrovoy-ekonomike (дата обращения: 16.04.2026).

24. Грищенко Л.Л. Применение технологий «цифрового двойника» города для обеспечения безопасности его жителей [Электронный ресурс] / Л.Л. Грищенко, Ю.Л. Корабельникова // Baikal Research Journal. – 2022. — Т. 13, № 4. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologiy-tsifrovogo-dvoynika-goroda-dlya-obespecheniya-bezopasnosti-ego-zhiteley/viewer (дата обращения: 07.11.2025).

25. Денисов С.Г. Цифровые двойники и новые человеко-машинные интерфейсы: возможности дополненной и виртуальной реальности / С.Г. Денисов // Бюллетень инновационных технологий. — 2023. — Т. 7. — № 4(28). — С. 25–29.

26. Дигилина О.Б., Эль-Сайед А.Х. Проблематика внедрения цифровых услуг в отраслях экономики стран персидского залива / О.Б. Дигилина, А.Х. Эль-Сайед // Горизонты экономики. – 2024. – № 6 (86). С. 89-98.

27. Дмитриева М.А. Цифровые тренды в стратегическом управлении и существующие ИТ-риски / М.А. Дмитриева, Ю.Н. Шедько // Управленческие науки. — 2023. — Т. 13, №2. — С. 6–15.

28. Докукин А.В., Ломакин М.И., Ниязова Ю.М. и др. Модель анализа применения цифровых двойников для прогнозирования инцидентов и обеспечения безопасности труда в промышленности // Безопасность труда в промышленности. — 2025. — № 8. — С. 39–44 .

29. Дьяченко О.В., Истомина Е.А. Теоретические основы цифровой экономики в документах стратегического планирования [Электронный ресурс] / О.В. Дьяченко, Е.А. Истомина // Вестник ЧелГУ. – 2018. – №8 (418). – с. 98-102 URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-osnovy-tsifrovoy-ekonomiki-v-dokumentah-strategicheskogo-planirovaniya (дата обращения: 16.04.2026).

30. Елин В.М. Технология цифрового двойника. понятие и особенности подхода к организационно-правовому обеспечению комплексной безопасности / В.М. Елин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Право». — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 68–75.

31. Завьялова Е.Б. Сделки в цифровую эпоху: технология блокчейн и смарт-контракты / Е.Б.Завьялова, Е.И.Шумская // Право и управление. XXI век. — 2019. — Т. 15. №3 (52). — С. 32-38.

32. Загурский А.В. Анализ рынка цифровых двойников и перспективы его развития [Электронный ресурс] / А.В. Загурский // Актуальные исследования. — 2024. — №11 (193). — Ч. II. — С. 21–24. — URL: https://apni.ru/article/8721-analiz-rinka-tsifrovikh-dvojnikov-i-perspekti (дата обращения: 07.09.2025).

33. Захаров В.М. Устойчивое развитие : экология, экономика, общество и культура : учебник / В.М. Захаров, А.В. Семенов, И.Е. Трофимов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Московский университет им. С.Ю. Витте / Центр устойчивого развития и здоровья среды ИБР РАН, 2023. — 212 с.

34. Иванов В.В. Цифровая экономика : мифы, реальность, перспектива / В.В. Иванов, Г.Г. Малинецкий. — Москва : Российская Академия наук, 2017. — 63 с.

35. Искосков М.О., Немцев А.Д., Шерстобитова А.А., Радионов М.Г. Влияние инструментов стратегического планирования на эффективность функционирования бизнес-моделей предприятий промышленности [Электронный ресурс] / М.О. Искосков, А.Д. Немцев, М.Г. Радионов // Вестник ВУиТ. – 2024. – №1 (53). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-instrumentov-strategicheskogo-planirovaniya-na-effektivnost-funktsionirovaniya-biznes-modeley-predpriyatiy-promyshlennosti (дата обращения: 16.04.2026).

36. Калиниченко М.П. Моделирование «цифрового» фактора в промышленности России [Электронный ресурс] / М.П. Калиниченко // Экономическое развитие России. – 2021. – №6. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-tsifrovogo-faktora-v-promyshlennosti-rossii (дата обращения: 16.04.2026).

37. Ковальчук Ю.А., Степнов И.М. Управление промышленными экосистемами в едином цифровом пространстве // Проблемы рыночной экономики. – 2022. – № 3. – С. 107-121.

38. Кожемяко С.В., Алпатова Э.С., Муртазина Г.Ф. Роль цифровых платформ в изменении структуры отраслевых рынков [Электронный ресурс] / С.В. Кожемяко, Э.С. Алпатова, Г.Ф. Муртазина // Московский экономический журнал. – 2025. – №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-tsifrovyh-platform-v-izmenenii-struktury-otraslevyh-rynkov (дата обращения: 16.04.2026).

39. Коровин Г.Б. Возможности применения цифровых двойников в промышленности / Г.Б. Коровин // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2021. — 27(8). — С. 124–133.

40. Кротова Т.Г. Применение цифровых двойников для борьбы с изменением климата странами — членами БРИКС / Т.Г. Кротова, Е.Б. Завьялова, С.Н. Синицын // Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. — 2025. — 27(1). — С. 167–180.

41. Кузовкова Т. А., Ермолаева В. Р. Анализ и развитие подходов к формированию стратегии реализации цифровых продуктов и сервисов [Электронный ресурс] / Т.А. Кузовкова, В.Р. Ермолаева // Экономика и качество систем связи. – 2024. – №2 (32). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-razvitie-podhodov-k-formirovaniyu-strategii-realizatsii-tsifrovyh-produktov-i-servisov (дата обращения: 16.04.2026).

42. Купчишина Е.В. Эволюция концепций цифровой экономики как феномена неоэкономики [Электронный ресурс] / Е.В. Купчина // Государственное управление. Электронный вестник. – 2018. – №68. С. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-kontseptsiy-tsifrovoy-ekonomiki-kak-fenomena-neoekonomiki (дата обращения: 16.04.2026).

43. Курегян С.В., Мелешко Ю.В. Механизмы взаимодействия цифрового производства, цифровых услуг и цифровых бизнес-моделей [Электронный ресурс] / С.В. Курегян, Ю.В. Мелешко // ТТПС. – 2021. – №2 (56). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizmy-vzaimodeystviya-tsifrovogo-proizvodstva-tsifrovyh-uslug-i-tsifrovyh-biznes-modeley (дата обращения: 16.04.2026).

44. Ледяева М. Как устроены цифровые двойники и зачем они нужны [Электронный ресурс] / М. Ледяева. — URL: https://rg.ru/2021/12/28/reg-szfo/kak-ustroeny-cifrovye-dvojniki-i-zachem-oni-nuzhny.html?ysclid=luvijdfsk3912366876 (дата обращения: 15.02.2025).

45. Ли Д.Э. Теоретические основы развития производства на предприятиях с использованием цифровых технологий [Электронный ресурс] / Д.Э. Ли // Raqamli iqtisodiyot (Цифровая экономика). 2025. №10. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-osnovy-razvitiya-proizvodstva-na-predpriyatiyah-s-ispolzovaniem-tsifrovyh-tehnologiy (дата обращения: 16.04.2026).

46. Макаров А.Н. О потенциале цифровой экономики в контексте форсайта экономической методологии и теории [Электронный ресурс] / А.Н. Макаров // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2022. – №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-potentsiale-tsifrovoy-ekonomiki-v-kontekste-forsayta-ekonomicheskoy-metodologii-i-teorii (дата обращения: 16.04.2026).

47. Малхасьян С. С., Сайко А. Г. Развитие бизнеса в эпоху инновационного менеджмента [Электронный ресурс] / С.С. Малхасьян, А.Г. Сайко // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – №4-4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-biznesa-v-epohu-innovatsionnogo-menedzhmenta (дата обращения: 16.04.2026).

48. Мартынова С. Финансирование российской науки в новых условиях : итоги 2022 г. [Электронный ресурс] / С. Мартынова, Т. Ратай // Наука. Технологии. Инновации. Экспресс-информация. — ИСИЭЗ НИУ ВШЭ. — 02.11.2023. — URL: https://issek.hse.ru/news/870116078.html (дата обращения: 07.11.2025).

49. Меньшаева А.А. Развитие цифровых двойников в российской промышленности [Электронный ресурс] / А.А. Меньшаева // Молодой ученый. — 2021. — № 11 (353). — С. 25–27. https://moluch.ru/archive/353/79138/ (дата обращения: 07.11.2025).

50. Михайлюк М.В. Цифровые экосистемы предпринимательства в современных реалиях / М.В. Михайлюк // Финансовые исследования. — 2022. — №4(77). — С. 50–58.

51. Морозова Т. Цифровизация бизнеса [Электронный ресурс] / Т. Морозова. — URL: https://www.kck.ru/solutions/cifrovizaciya-biznesa (дата обращения: 05.10.2025).

52. Мухачёва А.В. Система категорий цифровой экономики: эволюция подходов [Электронный ресурс] / А.В. Мухачева // Управленческие науки. – 2025. – №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-kategoriy-tsifrovoy-ekonomiki-evolyutsiya-podhodov (дата обращения: 16.04.2026).

53. Насиров Д.Ф., Шодиев Р.И.У., Олимбоев М.Ф.У. Роль цифровых инноваций в повышении эффективности инвестиционной деятельности в условиях трансформации экономики [Электронный ресурс] / Д.Ф. Насиров, Р.И.У. Шадиев,М.Ф.У Олимбоев // Raqamli iqtisodiyot (Цифровая экономика). – 2026. – №14.I. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-tsifrovyh-innovatsiy-v-povyshenii-effektivnosti-investitsionnoy-deyatelnosti-v-usloviyah-transformatsii-ekonomiki (дата обращения: 16.04.2026).

54. Ноакк Н. В., Ларин С. Н., Ларина Т. С. Комплексная модель доверия пользователей к продуктам цифровой экономики с учетом категорий социальных представлений и адаптации / [Электронный ресурс] / Н.В. Ноакк, С.Н. Ларин, Т.С. Ларина // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – №10-2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-model-doveriya-polzovateley-k-produktam-tsifrovoy-ekonomiki-s-uchetom-kategoriy-sotsialnyh-predstavleniy-i-adaptatsii (дата обращения: 16.04.2026).

55. Новиков Д. А. Кибернетика 2.0 / Д.А. Новиков // Проблемы управления. – 2016 – № 1, стр. 73–81

56. Паньшин Б. Цифровая экономика: понятия и направления развития [Электронный ресурс] / Б. Паньшин // Наука и инновации. – 2019. –№3 (193). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-ekonomika-ponyatiya-i-napravleniya-razvitiya (дата обращения: 16.04.2026).

57. Перспективы экономической глобализации: монография / коллектив авторов ; под ред. А.С. Булатова. — Москва : Кнорус, 2019. — С. 255–272.

58. Пичков О.Б. Влияние процессов цифровой трансформации на мировую экономику / О.Б.Пичков // Международные экономические отношения: реалии, вызовы и перспективы: монография / [Л.С.Ревенко, В.В.Перская, А.В.Холопов и др.] ; под общ. ред. и с предисл. Л.С.Ревенко; Моск. гос. ин-т междунар. отношений (ун-т) МИД России, каф. междунар. экон. отношений и внешнеэкон. связей им. Н.Н.Ливенцева. — М.: МГИМО-Университет, 2019. — С. 60-68.

59. Пичков О.Б. Риски и несовершенства развития цифровой экономики на современном этапе / О.Б.Пичков, А.А.Уланов // Страховое дело, №11 (296), 2017. — С. 3–8.

60. Пичугин В.Г. Адаптационная функция экономического поведения в условиях цифровой экономики [Электронный ресурс] / В.Г. Пичугин // АНИ: педагогика и психология. – 2020. – №4 (33). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/adaptatsionnaya-funktsiya-ekonomicheskogo-povedeniya-v-usloviyah-tsifrovoy-ekonomiki (дата обращения: 16.04.2026).

61. Подборнова Е.С. Влияние цифровых двойников на оптимизацию бизнес-процессов промышленных предприятий /[Электронный ресурс] / Е.С. Подборнова // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2024. – №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tsifrovyh-dvoynikov-na-optimizatsiyu-biznes-protsessov-promyshlennyh-predpriyatiy (дата обращения: 18.04.2026).

62. Попова Л.В., Лата М.С., Мелихов П.А. Цифровизация как драйвер устойчивого развития аграрной экономики региона [Электронный ресурс] / Л.В. Попова, М.С Лата, П.А. Мелихов // Вестник Адыгейского государственного университета. – Серия 5: Экономика. – 2022. – №1 (295). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-kak-drayver-ustoychivogo-razvitiya-agrarnoy-ekonomiki-regiona (дата обращения: 16.04.2026).

63. Прохоров А. Цифровая трансформация : анализ, тренды, мировой опыт [Электронный ресурс] / А. Прохоров, Л. Коник. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : КомНьюс Груп, 2019. — 368 с. — URL: https://ацим.рф/wp-content/uploads/2021/09/digital_transformation_book.pdf (дата обращения: 15.10.2025).

64. Прохоров А. Цифровой двойник : анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. — 1-е изд., испр. и доп. — Москва : АльянсПринт, 2020. — 401 с.

65. Реалии и перспективы цифровой трансформации экономики: Монография / В.Д.Миловидов, В.А.Онучак, С.Ю.Перцева [и др.]; под редакцией О.Б.Пичкова; Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации, кафедра международных экономических отношений и внешнеэкономических связей имени Н.Н.Ливенцева. М: МГИМО-Университет, 2020. — 209, [1] с.

66. Римская О. Н., Анохов И. В. Цифровые двойники и их применение в экономике транспорта [Электронный ресурс] / О.Н. Римская, И.В. Анохов // СРРМ. – 2021. – №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-i-ih-primenenie-v-ekonomike-transporta (дата обращения: 16.04.2026).

67. Се Я., Круглов Д.В. Эффективность труда в условиях развития цифровой экономики // Экономика труда. – 2024. – №9. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-truda-v-usloviyah-razvitiya-tsifrovoy-ekonomiki-1 (дата обращения: 16.04.2026).

68. Семенов Д.А. Параметры эффективности цифровой трансформации социальной сферы [Электронный ресурс] / Д.А. Семенов // Журнал прикладных исследований. – 2024. – №8. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-effektivnosti-tsifrovoy-transformatsii-sotsialnoy-sfery (дата обращения: 16.04.2026).

69. Синицын С.Н. Необходимость создания цифровых двойников в России / С.Н. Синицын // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2024. — Т. 1, № 3(144). — С. 77–84.

70. Синицын С.Н. Цифровые двойники как инструмент формирования бизнес-среды современных организаций / С.Н. Синицын // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. — 2024. — Т. 20, № 9(438).

71. Смирнов Евгений Николаевич Эволюция инновационного развития и предпосылки цифровизации и цифровых трансформаций мировой экономики [Электронный ресурс] / Е.Н. Смирнов // Вопросы инновационной экономики. – 2018. – №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-innovatsionnogo-razvitiya-i-predposylki-tsifrovizatsii-i-tsifrovyh-transformatsiy-mirovoy-ekonomiki (дата обращения: 16.04.2026).

72. Современные модели оценки и прогнозирования конкурентоспособности при разработке цифровых двойников сложных объектов [Электронный ресурс] / А.Ю. Подчуфаров и др. — URL: https://www.hse.ru/data/2021/12/25/1763508536/Doklad_k_17_12.pdf (дата обращения: 07.11.2025).

73. Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития [Электронный ресурс] / Д.А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — № 4. — С. 35–43. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-istoriya-vozniknoveniya-i-perspektivy-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.11.2025).

74. Стрелец И.А. Перспективы модификации поведения экономических агентов в глобальной информационной системе / И.А. Стрелец // Перспективы экономической глобализации: монография / под ред. А.С. Булатова. — Москва : КНОРУС, 2019. — С. 255–272.

75. Стрелец И.А. Цифровизация мировой торговли: масштабы, формы, последствия / И.А.Стрелец, С.В.Чебанов. — Текст: непосредственный // Мировая экономика и международные отношения. — 2020. — Т. 64, №1. — С. 15-25.

76. Тюрина Ю.Г. Зарубежный опыт налогообложения выбросов в атмосферный воздух: экономическое значение и направления реформирования [Электронный ресурс] / Ю.Г. Тюрина, М.А. Троянская // Финансы и кредит. — 2018. — Т. 24, № 5. — С. 1005–1015. — URL: https://www.fin-izdat.com/journal/fc/detail.php?ID=72826/ (дата обращения: 10.03.2024).

77. Хайлин Ю. Исследование инновационного сотрудничества цифровой экономики Китая и России [Электронный ресурс] / Ю. Хайлинь // КЭ. – 2020. – №7. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-innovatsionnogo-sotrudnichestva-tsifrovoy-ekonomiki-kitaya-i-rossii (дата обращения: 16.04.2026).

78. Хуриев Р.В. Перспективы цифровой трансформации системы высшего образования в современных условиях [Электронный ресурс] / Р.В. Хуриев // РППЭ. – 2021. – №12 (134). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-tsifrovoy-transformatsii-sistemy-vysshego-obrazovaniya-v-sovremennyh-usloviyah (дата обращения: 16.04.2026).

79. Цифровая культура управления активами в новых бизнес-моделях: монография (серия «Управление активами») / под редакцией И.М. Степнова, Ю.А. Ковальчук; Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации, Кафедра управления активами. — Москва: ИПР РАН, 2025.— 480

80. Цифровое технологическое лидерство бизнес-экосистем Ковальчук Ю.А., Степнов И.М. Друкеровский вестник. 2023. № 2 (52). С. 44-54.

81. Шешунова Е. В. Многокритериальные системы оптимизации в агропромышленном комплексе / Е.В. Шещунова // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 1. С. 67–76.

82. Шитов А. Мир машинного разума: погубит ли нас искусственный интеллект? / А. Шитов // ТАСС. — 20 ноября 2023. — URL: https://tass.ru/opinions/19328319 (дата обращения: 07.11.2025).

83. Шкрабовская А.Ю. Инновационные технологии в строительстве / А.Ю. Шкрабовская, Р.Г. Абакумов // Инновационная наука. — 2017. — № 4–3.

84. Шпак П.С. Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики [Электронный ресурс] / П.С. Шпак, Е.Г. Сычева, Е.Е. Меринская // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». — 2020. — URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/kontseptsiya-tsifrovyh-dvoynikov-kak-sovremennaya-tendentsiya-tsifrovoy-ekonomiki?ysclid=luz7qczfol520920789 (дата обращения: 15.09.2025).

85. Экономика строительства №4/2020 : периодическое издание [Электронный ресурс] / под ред. Е.П. Панкратова — Москва : Русайнс, 2020. — 80 с. — URL: https://book.ru/book/946811 (дата обращения: 24.10.2025).

86. Элияху М. Голдратт, Джефф Кокс / Цель. Процесс непрерывного совершенствования — Минск: Попурри, 2009. — 496 с.

**Научная литература на иностранных языках**

87. "Digital Twins for High-Rise Building Management in Southeast Asia" /WSP Global,,2022[Электронный ресурс]. – URL: https://www.wsp.com/en-gl/hubs/lifecycle-digital-twins#:~:text=Turn%20complex%20data%20into%20actionable,making%20across%20their%20entire%20lifecycle (дата обращения: 20.04.2026 год).

88. "Digital Twins in Construction: SmartMarket Report", Dodge Data & Analytics и Autodesk, 2021 [Электронный ресурс]. – URL: https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/pdfs/aec-smart-market-report-2021-bim-digital-transformation-en.pdf (дата обращения: 20.04.2026).

89. "Predictive Maintenance for Infrastructure Using Digital Twins", 2021, Siemens Smart Infrastructure Division [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950584922001331(дата обращения: 20.04.2026 год).

90. "Smart Bridges: Condition-Based Maintenance Using Digital Twins"/ Balfour Beatty [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/392330895_Smart_Structural_Monitoring_Real-Time_Bridge_Response_Using_Digital_Twins_and_Inverse_Analysis (дата обращения: 20.04.2026 год).

91. Beyond the Internet of Things. Everything Interconnected / ed. by J.M. Batalla, G. Mastorakis, C.X. Mavromoustakis, E. Pallis. — Springer, 2017. — 408 p.

92. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms [Электронный ресурс] / N. Ruth et al. // Journal of service management. — 2018. — Vol. 29 Issue 5. — P. 776–808. — URL: https://www.researchgate.net/publication/341251035_Customer_experience_challenges_bringing_together_digital_physical_and_social_realms (дата обращения: 15.02.2024).

93. Digital Twin Service towards Smart Manufacturing Procedia / Q. Qi et al. // CIRP. — 2018. — Vol. 72. — P. 237–242.

94. Digital Twins for Continuous mRNA Production / H.H. Hengelbrock, A. Schmidt, A.S. Jochen // Processes. — 2021. — 9(11).

95. Digital twins: The next frontier of factory optimization [Электронный ресурс] / S. Camarella et al. // Mckinsey & Company. — URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization (дата обращения: 07.11.2025).

96. Dong H. An Integrative View of the Concept of Digital Ecosystem / H. Dong, F. Khadeer Hussain, E. Chang [Электронный ресурс] // Third International Conference on Networking and Services, 2007. — URL: https://www.researchgate.net/publication/4314599_An_Integrative_view_of_the_concept_of_Digital_Ecosystem (дата обращения: 15.02.2025).

97. Eisenhardt K. M., Martin J. A. Dynamic capabilities: what are they? // Strategic Management Journal. 2000. Vol. 21, Issue 10–11. Pp. 1105–1121.

98. El Saddik A. Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies / A. El Saddik // IEEE Multi Media. — 2018. — Vol. 25, no. 2. — P. 87–92.

99. Filipe B.Reinventing construction: a route to higher productivity / Filipe Barbosa, Jonathan Woetzel, Jan Mischke, Maria Joao Ribeirinho, Mukund Sridhar, Matthew Parsons, Nick Berthram, Stephanie Brown // McKinsey Global Institute, February 2017.

100. Freeman R. Edward / Strategic Management: A Stakeholder Approach// Cambridge University Press, 11 мар. 2010 г.

101. Girsh Linda, Budrin Aleksandr / Talent management as a direction for the development of the organization's hu-man capital for creating innovations // January 2021- Economics and Environmental Management -DOI:10.17586/2310-1172-2021-14-1-76-84

102. Glaessgen E. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles [Электронный ресурс] / E. Glaessgen, D. Stargel // Paper for the 53rd Structural Dynamics and Materials Conference: Special Section on the Digital Twins. — 2012. — URL: http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2012-1818 (дата обращения: 02.10.2025).

103. Grieves M. Digital Twins, Simulation, and the Metaverse : Driving Efficiency and Effectiveness in the Physical World through Simulation in the Virtual Worlds / M. Grieves, E.Y. Hua. — Springer, 2002. — 445 p.

104. Hindsbo M. Modeling in the era of digital transformation / M. Hindsbo // Scientific and technical journal from the company. — 2018. — No. 5. — P. 1–4.

105. Ioannis Brilakis, Ajith Parlikad, "Data Integration for Predictive Digital Twins in Construction", Autodesk & University of Cambridge, 2022

106. Lee J. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems / J. Lee, B. Bagheri, H.A. Kao // Manufacturing Letters. — 2015. — 3. — P. 18–23.

107. Michael P. Gallaher и др. "Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry" National Institute of Standards and Technology (NIST), 2004

108. Negroponte N. Being Digital / N. Negroponte. — Knopf Doubleday Publishing Group, 1995. — 272 p.

109. Potgieter M.C. Modeling and optimization of complex systems and processes / M.C. Potgieter // Scientific and technical journal from the company. — 2018. — No. 5. — P. 21–24.

110. Pylianidis C. Introducing digital twins to agriculture / C. Pylianidis, S. Osinga, I.N. Athanasiadis // Computers and Electronics in Agriculture. — 2021. — Vol. 184. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920331471?via%3Dihub (дата обращения: 07.11.2025).

111. Schmidt H.L. Shenzhen Energy Ring, A Simple, Clear Form [Электронный ресурс] / H.L. Schmidt. — URL: https://www.theplan.it/eng/award-2024-Public-Space/shenzhen-energy-ring-a-simple-clear-form-schmidt-hammer-lassen (дата обращения: 07.08.2025).

112. Schuman C.A. Brent A. Asset life cycle management: towards improving physical asset performance in the process industry// June 2005International Journal of Operations & Production Management - 25(6):566-579

113. Tapscott D. Digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence / D. Tapscott. — New York ; San Francisco, California ; Washington, D.C. : McGraw-Hill, 1995. — 342 p.

114. Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. Strategic Management Journal, 18(7), 509–533.

115. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production / R. Söderberg et al. // CIRP Annals. — 2017. — Vol. 66, Iss. 1. — P. 137–140.

116. Volker Buscher, Léan Doody / "Digital Twin: Towards a Meaningful Framework"// Arup, 2019..

117. Wright L. How to tell the difference between a model and a digital twin / L. Wright, S. Davidson // Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci. — 2020/ — 7, 13.

**Отчеты, доклады, презентации, статистические сборники**

118. Digital Twins: The Next Frontier of Factory Optimization [Электронный ресурс] // McKinsey Report. — URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization (дата обращения: 15.10.2025).

119. Internet Crime Report [Электронный ресурс] // FBI. — URL: https://www.ic3.gov/AnnualReport/Reports/2022_IC3Report.pdf (дата обращения: 17.11.2025).

120. SILA Union. Итоги II Российского межотраслевого саммита «ПромIT: ИТ-новации для промышленности», декабрь 2025 [Электронный ресурс]. – URL: https://silaunion.ru/news/sila-union-na-mezhotraslevom-sammite-promit-cifrovye-iniciativy-v-promyshlennosti (дата обращения: 19.04.2026).

121. ГК InfoWatch. Экспертно-аналитический центр «Россия: утечки информации ограниченного доступа, 2023-2025 гг.», [Электронный ресурс]. – URL: https://www.infowatch.ru/company/presscenter/news/utechki-dannykh-teryayut-prozrachnost (дата обращения: 19.04.2026)

122. Доклад Европейской Комиссии «GHG Emissions of All World Countries» [Электронный ресурс]. — URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023 (дата обращения: 04.06.2025).

123. Индикаторы цифровой экономики : 2022 : статистический сборник / Г.И. Абдрахманова и др. — Москва : НИУ ВШЭ, 2023. — 332 с.

124. Индикаторы цифровой экономики : 2024 : статистический сборник / В.Л. Абашкин и др. — Москва : ИСИЭЗ ВШЭ, 2024. — 276 с.

125. Институт экономических стратегий. Theoretical concepts and methodological approaches to understanding production theory and cost analysis in the context of digitalization in microeconomics // MIC. — 2022. — №5 (106). — С. 62–68.

126. Модель ALCM [Электронный ресурс]. – URL: https://dinord.ru/di-news/chto-takoe-upravlenie-zhiznennym-ciklom-produkta-plm/ (дата обращения: 19.04.2026).

127. Наука : технологии : инновации : 2024 : краткий стат. сб. — Москва : ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, 2024. — 104 с.

128. Отчет НИУ МГСУ «Цифровизация строительной отрасли на всех этапах жизненного цикла ОКС» от 25.04.2022 [Электронный ресурс]. — URL: https://digital-build.ru/wp-content/uploads/2022/07/13029866.179299560164735928.1.2-1.pdf (дата обращения: 01.10.2025).

129. Презентация «Обоснование заявки МГИМО на участие в Техническом комитете по стандартизации “Информационное моделирование”».

130. Презентация компании Статконтроль, предоставляющей «Газпром нефть» программное обеспечение для создания цифрового месторождения нефти.

131. Разбираем тренды в мире DDoS-атак : отчет StormWall за третий квартал 2024 [Электронный ресурс] // StormWall. — URL: https://stormwall.pro/resources/blog/otchet-o-ddos-atakah-2024-tretij-kvartal (дата обращения: 07.11.2025).

**Интернет-источники на русском языке**

132. База данных Statista [Электронный ресурс]. — URL: https://www.statista.com/statistics/916625/global-generation-of-municipal-solid-waste-forecast/ (дата обращения: 26.06.2025).

133. В чем разница между цифровой моделью, цифровой тенью и цифровым двойником? [Электронный ресурс]. — URL: https://www.3dfindit.com/ru/engiclopedia/digitaltwins (дата обращения: 18.05.2025).

134. Виды цифровых двойников : что такое цифровой двойник, как и зачем их использовать бизнесу [Электронный ресурс]. — URL: https://www.calltouch.rublog/chto-takoe-czifrovoj-dvojnik-kak-i-zachem-ih-ispolzovat-biznesu/?ysclid=lv54gp7225898639083 (дата обращения: 15.02.2025).

135. Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР [Электронный ресурс] // Росэнергоатом. — URL: https://www.rosenergoatom.ru/about/programmnye-produkty/virtualno-tsifrovaya-aes-s-vver/ (дата обращения: 17.11.2025).

136. Власти обсудят введение ответственности за отказ от импортозамещения SAP [Электронный ресурс] // РБК. — 2025. — URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/04/08/2025/688cb3119a79477c32d51703 (дата обращения: 07.11.2025).

137. «Газпром нефть» создала цифровой двойник месторождения имени Александра Жагрина [Электронный ресурс] // Российское газовое общество. — URL: https://www.gazo.ru/ru/news/members/gazprom-neft-sozdala-tsifrovoy-dvoynik-mestorozhdeniya-imeni-aleksandra-zhagrina/ (дата обращения: 17.11.2025).

138. Двойники в сетях: как цифровизация меняет энергетику России [Электронный ресурс]. — URL: https://sber.pro/digital/publication/dvojniki-v-setyah-kak-cifrovizaciya-menyaet-energetiku-rossii/?ysclid=luvh7mq7ze148269102 (дата обращения: 07.09.2025).

139. Доля кибератак в обрабатывающей промышленности по всему миру с 2018 по 2024 год [Электронный ресурс] // Statista. — URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.4cf3e1b4-687e33bb-799ee661-74722d776562/https/www.statista.com/statistics/1374061/cyber-attacks-manufacturing-share-worldwide/ (дата обращения: 21.07.2025).

140. Завершено строительство первого завода по переработке отходов в энергию в ОАЭ [Электронный ресурс]. — URL: https://www.wam.ae/ru/article/hszrem3e-завершено-строительство-первого-завода-переработке (дата обращения: 17.11.2025).

141. Информационная безопасность в 2024 году: от «галочки» к осознанности [Электронный ресурс]. — URL: https://www.novostiitkanala.ru/news/detail.php?ID=175120 (дата обращения: 16.02.2025).

142. Информационное сообщение Классификатора строительной информации [Электронный ресурс] // КСИ. — URL: http://ksi.faufcc.ru/ (дата обращения: 12.11.2025).

143. Испытания «Железной птицы» [Электронный ресурс]. — URL: https://www.aviationunion.ru/media/news/10081/?ysclid=lvgrvrgsr7944157731 (дата обращения: 15.10.2025).

144. ИТ-рынок Китая [Электронный ресурс]. — URL: https://clck.ru/3QF5yF (дата обращения: 07.11.2025).

145. Как новые технологии изменят жизнь россиян [Электронный ресурс] // ТАСС. — URL: https://tass.ru/nacionalnye-proekty/6469993 (дата обращения: 07.11.2025).

146. Как обеспечить кибербезопасность своего бизнеса в 2024 году [Электронный ресурс]. — URL: https://companies.rbc.ru/news/wUFvbgOC3l/kak-obespechit-kiberbezopasnost-svoego-biznesa-v-2024-godu/ (дата обращения: 03.11.2025).

147. Как развивается IT-рынок Латинской Америки и какие у него перспективы [Электронный ресурс] // РБК. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/66d045e29a7947553a8f9986?from=copy (дата обращения: 07.11.2025).

148. Как цифровые двойники помогают российской промышленности [Электронный ресурс]. — URL: https://rb.ru/longread/digital-twin/ (дата обращения: 15.02.2025).

149. Китай насчитал у себя 10 тыс. цифровых двойников предприятий [Электронный ресурс] // Pro Shering. — 2024. — URL: https://sharingpro.ru/kitaj-naschital-u-sebja-10-tys-cifrovyh-dvojnikov-predprijatij/ (дата обращения: 07.11.2025).

150. Корпоративный научно-проектный комплекс [Электронный ресурс]. — URL: https://limited.rosneft.ru/Development/knpk/ (дата обращения: 07.11.2025).

151. От моделей до предсказаний: что могут цифровые двойники и кто их создает [Электронный ресурс]. — URL:

https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/637b31bc9a794783c9258e82 (дата обращения: 16.04.2025).

152. Оценка влияния внедрения цифрового двойника на эффективность бизнес-процессов промышленного предприятия [Электронный ресурс]. — URL: http://elar.urfu.ru; http://elar.urfu.ru/handle/10995/109399 (дата обращения: 07.11.2025).

153. Перспективы рынка цифровых двойников [Электронный ресурс]. — URL: https://www.researchnester.com/ru/reports/digital-twin-market/4226#market-trends (дата обращения: 07.11.2025).

154. План мероприятий («дорожная карта») «ТЕХНЕТ» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы [Электронный ресурс]. — URL: https://nti2035.ru/documents/docs/ДК%20Технет.pdf (дата обращения: 07.11.2025).

155. Подробное руководство по технологии цифровых двойников [Электронный ресурс]. — URL: https://www.testingxperts.com/blog/digital-twin/ca-en#Evolution%20of%20Digital%20Twin%20Technology (дата обращения: 14.03.2025).

156. Потери от киберпреступности [Электронный ресурс]. — URL: https://clck.ru/3QF8TS (дата обращения: 17.11.2025).

157. Почему цифровые технологии вытесняют аналоговые [Электронный ресурс] // Тренды РБК. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/60e427ea9a79471089a0ec1d?from=copy (дата обращения: 15.02.2025).

158. Правительство России утвердило «Концепцию технологического развития до 2030 г.» [Электронный ресурс] // Министерство науки и высшего образования РФ. — 25.05.2023. — URL: https://minobrnauki.gov.ru/ press-center/news/novosti-ministerstva/68378 (дата обращения: 07.11.2025).

159. Разница между компьютерным зрением и машинным обучением [Электронный ресурс]. — URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.592e360e-662f6392-b4c16489-

74722d776562/https/www.tutorialspoint.com/difference-between-computer-vision-and-machine-learning (дата обращения: 07.11.2025).

160. Результаты исследования проблем внедрения технологий информационного моделирования в инвестиционно-строительных проектах российских компаний [Электронный ресурс]. — URL: https://mgsu.ru/news/2022/Otchet_rez_issled_problem_TIM.pdf (дата обращения: 01.10.2025).

161. «Роснефть» запустила проект «Цифровое месторождение» в Башкирии [Электронный ресурс] // Роснефть. — 19 мая 2019. — URL: https://www.rosneft.ru/press/news/item/195043/ (дата обращения: 21.05.2025).

162. Рынок цифровых двойников [Электронный ресурс] // Kings Research. — URL: https://www.kingsresearch.com/ru/digital-twin-market-1196 (дата обращения: 07.11.2025).

163. Сайт Inner Engineering [Электронный ресурс]. — URL: https://inner.su/articles/tablitsa-ugroz-promyshlennykh-sistem-2025-virusy-kiberataki-uyazvimosti/ (дата обращения: 21.07.2025).

164. Сайт Айбим [Электронный ресурс]. — URL: https://bim-info.ru/ (дата обращения: 07.11.2025).

165. Самолет наизнанку : как МиГ воспроизводит поведение самолетов на земле [Электронный ресурс]. — URL: https://lenta.ru; https://lenta.ru/articles/2017/06/07/iron_bird (дата обращения: 15.02.2025).

166. СП 328.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели» [Электронный ресурс] // Минстрой. — 2001. — URL: https://minstroyrf.gov.ru/docs/16400/ (дата обращения: 07.11.2025).

167. СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла» [Электронный ресурс] // Росстандарт. — 2001. —

https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&baseC=101&RegNum=54&DocOnPageCount=15&page=11&id=240318 (дата обращения: 07.11.2025).

168. Страны Персидского залива и будущее IT [Электронный ресурс] // Forbes. — URL: https://blogs.forbes.ru/2023/10/17/strany-persidskogo-zaliva-i-budushhee-it/ (дата обращения: 07.11.2025).

169. Стратегия развития «Газпром нефть» до 2030 года [Электронный ресурс]. — URL: https://www.gazprom-neft.ru/company/about/strategy/ (дата обращения: 06.07.2025).

170. Технологии визуализации как процесс создания цифрового двойника организации в области управления рисками [Электронный ресурс]. — URL: https://elar.urfu.ru;
https://elar.urfu.ru/handle/10995/119934?ysclid=lvch6belp6287347079 (дата обращения: 15.02.2025).

171. Топ-10 трендов цифровизации [Электронный ресурс] // Ростелеком Бизнес. — URL: https://rostelecom.vedomosti.ru/top-trends.html (дата обращения: 07.11.2025).

172. Тренды фишинговых атак на организации в 2022–2023 гг. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/phishing-attacks-on-organizations-in-2022-2023/ (дата обращения: 01.11.2025).

173. Удобрения влияют на климат сильнее всей мировой авиации и судоходства [Электронный ресурс]. — URL: https://agbz.ru/news/udobreniya-vliyayut-na-klimat-silnee-vsey-mirovoy-aviatsii-i-sudokhodstva/ (дата обращения: 07.11.2025).

174. УП П-01, команда № 1, Установка оборудования для входа в университет с помощью распознавания лица [Электронный ресурс] // 20.35 Университет. — URL: https://pt.2035.university/project/up-p-01-komanda-no-1 (дата обращения: 07.11.2025).

175. Цифровое проектирование сегодня и завтра: модели, двойники и умные производства [Электронный ресурс]. — URL:

https://engineer.yadro.com/article/digital-twins/?ysclid=luz9smhc7j613904329 (дата обращения: 15.02.2025).

176. Цифровое раздвоение: рассказываем о технологии «Цифровой двойник» [Электронный ресурс]. — URL: https://dprom.online/oilngas/tsifrovoe-razdvoenie-o-tehnologii/?ysclid=luvhqzyauo980834096 (дата обращения: 07.09.2025).

177. Цифровой двойник – что это такое? Объемная картинка или работающий актив? [Электронный ресурс]. — URL: https://habr.com/ru/articles/718060/ (дата обращения: 15.08.2025).

178. Цифровой двойник Digital Twin of Organization, DTO [Электронный ресурс]. — URL: https://clck.ru/3QEZwK (дата обращения: 07.11.2025).

179. Цифровой двойник: экспериментируя с будущим [Электронный ресурс]. — URL: https://rostec.ru/media/news/tsifrovoy-dvoynik-eksperimentiruya-s-budushchim/ (дата обращения: 07.11.2025).

180. Цифровые двойники в промышленности: возможности, перспективы, риски [Электронный ресурс]. — URL: // https://umbrellait.ru/blog/czifrovye-dvojniki-v-promyshlennosti-vozmozhnosti-perspektivy-riski/ (дата обращения: 07.11.2025).

181. Цифровые двойники в промышленности: что это, как их развивают в России и какие предприятия используют [Электронный ресурс]. — URL: https://indpages.ru/solutions/czifrovye-dvojniki-v-promyshlennosti/?ysclid=luvheo8s8a613987316 (дата обращения: 15.08.2025).

182. Цифровые технологии в бизнесе: практики и барьеры использования мониторинг цифровой трансформации бизнеса [Электронный ресурс] // Высшая школа экономики. — URL: https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/890550370.pdf (дата обращения: 05.10.2025).

183. Численное моделирование для разработки новых продуктов и технологий [Электронный ресурс]. — URL: https://habr.com/ru/companies/severstal/articles/542486/ (дата обращения: 15.02.2025).

184. Число кибератак в России и в мире [Электронный ресурс] / TADVISER. — URL: https://clck.ru/3QF2eC (дата обращения: 19.09.2023).

185. Что такое цифровой двойник и как это связано с Big Data [Электронный ресурс]. — URL: https://bigdataschool.ru/blog/digital-twin-plm-iot-big-data/ (дата обращения: 07.11.2025).

186. Что такое цифровой двойник, как и зачем их использовать бизнесу [Электронный ресурс]. — URL: https://www.calltouch.rublog/chto-takoe-czifrovoj-dvojnik-kak-i-zachem-ih-ispolzovat-biznesu/?ysclid=lv54gp7225898639083 (дата обращения: 15.02.2025).

187. Что такое цифровые двойники и где их используют [Электронный ресурс]. — URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb?from=copy (дата обращения: 07.11.2025).

188. Win32/Industroyer: новая угроза для промышленных систем управления [Электронный ресурс]. — URL: https://habr.com/ru/companies/eset/articles/330730/ (дата обращения: 21.07.2025).

189. Скандал городского строительства: секрет сверхбыстрого строительства Москвы в цифре [Электронный ресурс]. – URL: https://moscow.allestate.pro/news/12.07.2025/skandal-gorodskogo-stroitelstva-sekret-sverhbystrogo-stroitelstva-moskvy-v-cifre (дата обращения: 20.04.2026 года).

190. Росконгресс. «Умный город: как цифровые технологии меняют городскую среду и повседневную жизнь» [Электронный ресурс]. - https://roscongress.org/materials/umnyy-gorod-kak-tsifrovye-tekhnologii-menyayut-gorodskuyu-sredu-i-povsednevnuyu-zhizn/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения: 31.03.2026 год.)

191. Большая Российская энциклопедия. Электронный ресурс. Режим доступа: https://bigenc.ru/c/optimizatsiia-79076e (Дата обращения 2 мая 2026)

192. Neftegaz.RU.Интернет-портал. Электронный ресурс. Режим доступа: https://neftegaz.ru/tech-library/economy/146658-optimizatsiya/ (Дата обращения: 2 мая 2026)

193. Stuxnet: война 2.0 [Электронный ресурс]. — URL: https://habr.com/ru/articles/105964/ (дата обращения: 18.07.2025).

194. Киберзащитная реакция [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. — 07.02.2025. — URL: https://www.kommersant.ru/doc/7480689 (дата обращения: 07.11.2025).

195. Объем рынка цифровых близнецов к 2030 году составит $16,7 млрд: IndustryARC [Электронный ресурс] // iCrowdNewswire. — URL: https://clck.ru/3QF7GS (дата обращения: 07.11.2025).

196. Буфет онлайн [Электронный ресурс] // 20.35 Университет. — URL: https://pt.2035.university/project/bufet-onlajn (дата обращения: 07.11.2025).

197. Умный гардероб [Электронный ресурс] // 20.35 Университет. — URL: https://pt.2035.university/project/umnyj-garderob_2022_04_14_01_11_09 (дата обращения: 07.11.2025).

**Интернет-источники на иностранных языках**

198. China Smart City Industry Market Analysis 2022 [Электронный ресурс]. — URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/china-smart-city-market-88009927.html; https://froodl.com/china-smart-cities-market-industry-analysis-growth-trends-and-forecasts-2023-2030 (дата обращения: 17.11.2025).

199. Cloud Computing Research [Электронный ресурс] // Verified Market Research. — URL: https://www.verifiedmarketresearch.com/rcategory/cloud-computing-internet-communication-technology/ (дата обращения: 07.11.2025).

200. Digital twin — statistics & facts [Электронный ресурс] // Statista. — URL: https://www.statista.com/topics/9847/digital-twin/?srsltid=AfmBOoq-dZ0FgpHTbWGdXUBv3QuqITmJsiNVfaywXkESghND-mrYz39I (дата обращения: 07.11.2025).

201. Digital Twin Market Size, Share, Industry Report, Revenue Trends and Growth Drivers 2025–2030 [Электронный ресурс] // Marketsandmarkets. — URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html (дата обращения: 07.11.2025).

202. Digital Twin Use Cases in Manufacturing [Электронный ресурс]. — URL: https://blogs.3ds.com/exalead/2019/07/03/digital-twinuse- cases-in-manufacturing-part-5-12/ (дата обращения: 28.05.2025).

203. Digital Twins for Continuous mRNA Production / H. Helgers et al. // Processes. — 2021. — 9(11). — P. 19–67.

204. NZ Fry Up: National digital twin on the agenda, with smarter construction one benefit; Digital communications minister taking charge [Электронный ресурс]. — URL: https/www.computerworld.com/article/1614836/nz-fry-up-national-digital-twin-on-the-agenda-with-smarter-construction-one-benefit-digital-communi.html (дата обращения: 15.02.2025).

205. What is the value of a Digital Twin? High Teck Software Cluster [Электронный ресурс]. — URL: https://hightechsoftwarecluster.nl/paper/what-is-a-digital-twin-and-whatvalue-does-it-deliver/ (дата обращения: 28.05.2025).