

Савонина Алина Арутюновна

студентка, Кубанский государственный аграрный университет, г.

Краснодар

Кондратьев Валерий Юрьевич

доцент, кандидат экономических наук, Кубанский государственный

университет, г. Краснодар

ПРИМИНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В УПРАВЛЕНИИ ПРОИЗВОДСТВОМ И ГОРОДСКИМ ХОЗЯЙСТВОМ

Аннотация. В статье проведён сравнительный анализ применения цифровых двойников (Digital Twin) в управлении производством и городским хозяйством. Рассмотрены архитектура, уровни зрелости (от описательного до автономного) и типология цифровых двойников. Проанализированы успешные практики промышленности (Газпром нефть, Северсталь, Росатом и городского хозяйства (транспортная система Москвы, теплоснабжение Казани водоснабжение Санкт-Петербурга) Выявлены основные барьеры внедрения технологические (отсутствие стандартов), организационные (сопротивление персонала), экономические (ROI 2-5 лет) и правовые (статус цифрового двойника). На основе анализа предложены рекомендации по масштабированию и преодолению барьеров. Сделан вывод о необходимости формирования отраслевых стандартов и создания государственных тестовых полигонов.

Annotation. The article provides a comparative analysis of the application of digital twins in production management and urban management. The architecture, maturity levels (from descriptive to autonomous) and typology of digital twins are considered. Successful industrial practices (Gazprom Neft, Severstal, Rosatom) and urban management (Moscow transport system, Kazan heat supply, St. Petersburg water supply) are analyzed. The main barriers to implementation are identified: technological (lack of standards) organizational (staff resistance), economic (ROI 2-5 years) and legal (status of a digital twin) Based on the analysis, recommendations

for scaling and overcoming barriers are proposed. It is concluded that it is necessary to form industry standards and create state test sites.

Ключевые слова: цифровые двойники digital twin, индустрия 4.0, умный город предиктивное обслуживание, городское хозяйство.

Keywords: digital twins, digital twin, industry 4.0, smart city, predictive maintenance, urban management.

Введение

Цифровая трансформация экономики достигла этапа, когда конкурентные преимущества определяются способностью предприятий и муниципальных образований работать с данными в реальном времени. Технология цифровых двойников (Digital Twin) - одна из наиболее динамично развивающихся в парадигме Индустрии 4.0 и концепции «Умного города». Согласно аналитике MarketsandMarkets, рынок цифровых двойников в 2025 году превысил 15 млрд долл. США, а среднегодовой темп роста до 2030 года оценивается в 40-45%.

Цифровой двойник - это динамическая виртуальная модель физического объекта, процесса или системы, которая поддерживает двунаправленный обмен данными со своим физическим прототипом в реальном времени. В отличие от традиционного имитационного моделирования, цифровой двойник получает данные с датчиков постоянно, что позволяет не только прогнозировать, но и влиять на состояние оригинала.

В основе работы цифрового двойника лежит непрерывный двусторонний поток данных. Физический объект (станок, здание, трубопровод) оснащается датчиками, которые в реальном времени передают информацию о параметрах работы, нагрузках, температуре, вибрации и других характеристиках. Виртуальная модель обрабатывает эти данные, прогнозирует будущие состояния, выявляет скрытые аномалии и - при наличии обратной связи - отправляет управляющие команды на исполнительные механизмы. Таким образом, цифровой двойник - это не статическая 3D-модель, а живая, самообучающаяся система, сопровождающая объект на всём жизненном цикле.

Актуальность темы обусловлена высокой аварийностью и износом основных фондов в российской промышленности (свыше 50% оборудования эксплуатируется сверх нормативного срока), дефицитом квалифицированных диспетчеров и технологов, а также необходимостью повышения эффективности городского хозяйства, где коммунальные потери достигают 20-30%.

Цель работы - систематизировать подходы к применению цифровых двойников в управлении производством и городским хозяйством, выявить успешные практики и сформулировать рекомендации по преодолению барьеров внедрения.

1. Теоретические основы технологии цифровых двойников

Концепция цифрового двойника была впервые сформулирована Майклом Гривзом в 2002 году, однако практическая реализация стала возможной с развитием трёх технологий: интернета вещей (IoT) облачных вычислений и искусственного интеллекта.

Архитектура цифрового двойника включает следующие слои:

- **физический слой** - объект с установленными датчиками и исполнительными механизмами;
- **слой передачи данных** - промышленные протоколы (OPC UA, MQTT, Modbus TCP/IP);
- **информационный слой** - базы данных временных рядов, озера данных;
- **модельный слой** - совокупность математических моделей (физические, статические, нейросетевые);
- **прикладной слой** - пользовательские интерфейсы, АРМы диспетчеров, интеграция с ERP/SCADA.

Базовые свойства цифровых двойников:

- **Связанность с реальным объектом** - отсутствие автономности от физического прототипа.
- **Онлайн-синхронизация** - задержка между состоянием объекта и его моделью минимальна.

- **Эволюционируемость** - модель переобучается и уточняется по мере накопления данных.

- **Двунаправленность** (не всегда обязательна, но критична для автономных систем) - возможность воздействия на объект.

- **Многомасштабность** - один двойник может описывать как отдельный датчик, так и целый цех или район города.

Уровни зрелости цифрового двойника (по классификации Gartner):

1. Описательный - визуализация текущего состояния.
2. Диагностический - выявление причин отклонений.
3. Прогностический - предсказание состояния на заданный интервал времени.
4. Прескриптивный - формирование рекомендаций по управляющим воздействиям.
5. Автономный - замкнутый цикл управления без участия человека.

В промышленности доминируют уровни 2-4, в городском хозяйстве - 1-3 (из-за сложности полной автоматизации).

Принципиальное отличие цифрового двойника от традиционного моделирования и BIM:

- Традиционное моделирование (CAD/CAE) - расчёт «в отрыве» от реальности, обычно однократный или с редкими калибровками.

- BIM (Building Information Model) - статическая информационная модель здания, не обязательно работающая в реальном времени.

- Цифровой двойник - динамическая модель, непрерывно подстраивающаяся под показания датчиков с физического объекта.

Типология по охвату:

- двойник изделия (планирование жизненного цикла);
- двойник процесса (оптимизация параметров);
- двойник системы (цех, завод, район города).

2. Применение цифровых двойников в управлении производством

Промышленность является драйвером внедрения DT-технологий. Основные эффекты: сокращение внеплановых простоев на 30-50%, снижение затрат на ТОиР на 15-25%, повышение качества продукции на 10-20%.

2.1 Предиктивное обслуживание оборудования

Традиционная система планово-предупредительного обслуживания (ППР) заменяется обслуживанием по фактическому состоянию. Цифровой двойник агрегата (турбины, насоса, станка с ЧПУ) аккумулирует вибрационные данные, температурные режимы, токи и напряжения.

Пример: ПАО «Газпром нефть» внедрило цифровые двойники на 85% турбокомпрессоров. Алгоритмы машинного обучения распознают предотказные состояния за 14-21 день до аварии. Точность прогноза - 92%, экономический эффект - более 500 млн руб./год.

2.2 Оптимизация технологических процессов

На металлургических и химических производствах цифровой двойник ведет процесс в двух режимах: «shadow mode» (параллельный расчет) и «advisory mode» (подсказки оператору). В АО «Северсталь» двойник доменной печи предложил режим обогащения дутья кислородом, что сократило расход кокса на 3% (экономия ~ 200 млн руб./год).

2.3 Цифровые двойники изделий

В машиностроении (в т.ч. авиастроении) двойник сопровождает изделие от проектирования до утилизации. В ПАО «ОАК» цифровой двойник самолета Суперджет 100 накапливает данные о наработке каждого агрегата, что позволяет перейти от регламентного обслуживания к СМП (состояние-ориентированному ремонту).

2.4 Организационные изменения

Внедрение цифровых двойников требует создания центров компетенций. Например, в Госкорпорации «Росатом» эксплуатируется отраслевая платформа

«Логос» для построения цифровых двойников объектов использования атомной энергии.

Таблица 1. Сравнение эффективности управления производством с ДТ и без ДТ

Показатель	Без ДТ	С ДТ (3 года)	Изменение
Среднее время простоя оборудования (ч/мес)	28	12	-57%
Затраты на ТОиР, млн руб/год	120	84	-30%
Брак, %	4,2	2,8	-33%
Загрузка персонала рутинными отчетами, %	40	12	-70%

3. Применение цифровых двойников в городском хозяйстве

Городское хозяйство - сложная киберфизическая система, включающая транспорт, энергоснабжение, водоснабжение, управление отходами, ЖКХ. Цифровые двойники городов классифицируются как City Digital Twins (CDT).

3.1 Управление транспортной системой

Цифровой двойник транспортной сети агрегирует данные с камер, дорожных детекторов, GPS общественного транспорта, каршеринга. Прогнозирование заторов осуществляется с горизонтом 30-60 минут.

Пример: Цифровой двойник Московского транспортного узла (разработка - ГБУ «ЦОДД») использует агентное моделирование. В результате внедрения: время прохождения маршрутов наземным транспортом снизилось на 12%, количество ДТП с пострадавшими уменьшилось на 9%.

3.2 Энергетика и теплоснабжение

Двойник теплосети позволяет балансировать гидравлические режимы, находить скрытые утечки, оптимизировать температуру теплоносителя. В г. Казани система цифровых двойников 15 котельных сократила перерасход газа на 8% (130 млн руб./год) и уменьшила количество жалоб на температуру в квартирах на 34%.

3.3 Водоснабжение и водоотведение

Виртуальная модель водопроводной сети с датчиками давления, расхода, качества воды обнаруживает зоны низкого давления и скрытые утечки (которые по обычным методам не локализуются). В Санкт-Петербурге ГУП «Водоканал» сообщает о снижении неучтенных расходов воды на 18% после внедрения системы на пилотном участке.

3.4 Управление жилищно-коммунальным хозяйством

Цифровой двойник многоквартирного дома - растущая практика. Датчики температуры, влажности, протечек, состояния лифтов, работы мусоропровода дают управляющей компании панель контроля. Жители получают мобильное приложение с данными по своему дому. В Республике Татарстан в рамках проекта «Умный дом» оцифровано более 2 тысяч многоквартирных домов; снижение затрат на аварийно-диспетчерскую службу - 40%.

3.5 Стратегическое планирование

Весь город как цифровой двойник используется для «what-if»-анализа: как изменится транспортная ситуация при строительстве нового микрорайона, где лучше разместить станцию скорой помощи, как отреагирует энергосистема на аномальные морозы.

Пример: в г. Иннополис работает демо-стенд цифрового двойника с симуляцией сценариев «Отключение ТЭЦ-1» и «Реконструкция развязки».

Таблица 2. Ключевые эффекты от внедрения ДТ в городском хозяйстве

Сфера	Снижение потерь/затрат	Повышение качества услуг
Транспорт	12-15% времени в пути	±18% довольных маршрутами
Теплоснабжение	8-12% тепла	-25% жалоб
Водоснабжение	15-20% неучтенной воды	-40% аварий
Управление отходами	20% пробега мусоровозов	Чистота контейнерных площадок

4. Сравнительный анализ и кросс-отраслевые пересечения

Несмотря на разницу в объектах (станок vs. городской квартал), универсальный цикл создания цифрового двойника включает:

1. **Сенсоризацию** - оснащение объекта датчиками.
2. **Сбор и очистку данных** - устранение шумов, пропусков, привязка ко времени.
3. **Построение модели** (физической, статистической, нейросетевой).
4. **Валидацию и калибровку** - проверку на реальных данных.
5. **Эксплуатацию** (мониторинг, прогнозы, advisory / автономный режим).
6. **Актуализацию** - переобучение при изменении физического объекта.

При всей специфике сфер управления производством и городским хозяйством существуют общие методологические вызовы:

1. *Масштабируемость.* То, что работает на одном станке или одном доме, даёт сбой при масштабировании на весь завод или район.
2. *Качество исходных данных.* «Garbage in, garbage out» - до 60% времени внедрения ДТ уходит на очистку и выравнивание телеметрии.
3. *Интеграция с legacy-системами.* На заводах - устаревшие контроллеры (PLC) без цифровых интерфейсов; в городах - отсутствие единой цифровой платформы у разных коммунальных служб.
4. *Кибербезопасность.* Цифровой двойник расширяет поверхность атаки. Компрометация двойника энергосети может привести к реальному отключению.

В производстве преобладает PLM-подход (Product Lifecycle Management), в городском хозяйстве - GIS-подход (Geographic Information Systems). Перспективным является их объединение в рамках концепции «Industrial Metaverse»

5. Барьеры внедрения и пути их преодоления

Систематизируем барьеры:

- *Технологические*: отсутствие единых стандартов обмена данными и метаописания моделей; высокая стоимость вычислительных ресурсов для сложных двойников (гидро/газодинамика).

- *Организационные*: сопротивление персонала («чёрный ящик отнимет работу»); необходимость формирования новых ролей (Data Scientist, Digital Twin Engineer).

- *Экономические*: длительный ROI (от 2 до 5 лет); высокая стоимость «первого экземпляра» (создание валидированной физико-математической модели).

- *Правовые*: статус цифрового двойника как доказательства при авариях и спорах не урегулирован; вопросы ответственности (ошибка нейросети vs ошибка оператора).

Пути преодоления:

- формирование консорциумов и отраслевых стандартов (например, стандарты Digital Twin Consortium);

- развитие low-code платформ для создания двойников непрофильными специалистами;

- введение налоговых льгот на внедрение предиктивной аналитики;

- создание государственных тестовых полигонов («цифровые песочницы»).

6. Перспективные направления развития

1. *Гибридное моделирование* - сочетание физических моделей на основе дифференциальных уравнений с нейросетевыми суррогатами для ускорения расчётов в 100-1000 раз.

2. *Экосистемы взаимосвязанных двойников* - двойник завода + двойник поставщика + двойник логистики + двойник энергосистемы города.

3. *Цифровые двойники человека* - эргономика рабочих мест, управление безопасностью труда.

4. *Распределённые реестры (блокчейн)* для обеспечения доверия к данным от разных источников.

5. *Применение генеративного ИИ* для автоматической донастройки математических моделей по новым данным.

В городском хозяйстве - внедрение двойников не только для инженерной инфраструктуры, но и для социальной сферы (поток пациентов, нагрузка на школы).

Заключение

Технология цифровых двойников доказала свою эффективность как в промышленности (снижение простоев, оптимизация ТОиР), так и в городском хозяйстве (повышение надёжности сетей, качество управления транспортом). Однако массовое внедрение ограничено не столько технологическими трудностями, сколько организационной инерцией и дефицитом методологии.

В ближайшие 5-7 лет следует ожидать:

- появления национальных стандартов РФ на цифровые двойники критической инфраструктуры;
- перехода от прототипов к промышленным экосистемам двойников (Digital Twin as a Service);
- интеграции двойников в системы поддержки принятия государственных решений.

Для российских предприятий и муниципалитетов стратегически важным является не отставание в гонке цифровых двойников, так как это напрямую влияет на конкурентоспособность и качество жизни.

Список литературы

1. Гривз М., Веккер Дж. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. - Springer, 2020. - 245 с.
2. Tao F., Zhang M., Nee A.Y.C. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. - Academic Press, 2019. - 328 с.
3. Батов Г.А., Смирнов А.В. Цифровые двойники: состояние и перспективы // Информационные технологии в промышленности. 2024. № 2. С. 34-41.

4. Шестаков А.Л., Коровин М.Г. Применение цифровых двойников в городском хозяйстве: мировой и российский опыт // Умные города. 2025. №1. С. 12-29.
5. Отчёт ПАО «Газпром нефть»: Цифровые двойники производственных активов за 2024 год. - М., 2025.
6. Digital Twin Consortium. Architecture Framework and Implementation Guide. Version 2.0, 2025. URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org> (дата обращения: 10.03.2026).
7. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. - М.: ФГБУ «РСТ», 2021.
8. Косенков С.И. Правовой статус цифровых двойников в промышленности // Хозяйство и право. 2025. № 4. С. 65-71.
9. Cerruti S. et al. Digital Twins for Urban Mobility: A Review // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2025. Vol. 26(2). P. 1120-1137.

References

1. Greaves M., Wecker J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. - Springer, 2020. - 245 p.
2. Tao F., Zhang M., Nee A.Y.C. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. - Academic Press, 2019. - 328 p.
3. Batov G.A., Smirnov A.V. Digital Twins: Status and Prospects // Information Technologies in Industry. 2024. No. 2. pp. 34-41.
4. Shestakov A.L., Korovin M.G. Application of Digital Twins in Urban Economy: Global and Russian Experience // Smart Cities. 2025. No. 1. pp. 12-29.
5. Gazprom Neft PJSC Report: Digital Twins of Production Assets for 2024. Moscow, 2025.
6. Digital Twin Consortium. Architecture Framework and Implementation Guide. Version 2.0, 2025. URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org> (accessed: 10.03.2026).
7. GOST R 57700.37-2021. Computer Models and Modeling. Digital Twins of Products. General Provisions. Moscow: RST, 2021.

8. Kosenkov S.I. Legal Status of Digital Twins in Industry // Business and Law. 2025. No. 4. pp. 65-71.
9. Cerruti S. et al. Digital Twins for Urban Mobility: A Review // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2025. Vol. 26(2). P. 1120-1137.