

УДК 69.04

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-73-81](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-73-81)**В.В. ТКАЧЕНКО**

АО «ТЕХНАДЗОР», ул. Бутлерова, д. 17, г. Москва, 117342, Российская Федерация

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЧАСТНОГО ДОМА: ЗАРУБЕЖНЫЕ ПОДХОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ИНДИВИДУАЛЬНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Аннотация

Введение. Цифровизация строительной отрасли, включая индивидуальное жилищное строительство, становится глобальным трендом. Технология цифрового двойника (Digital Twin, DT) позволяет создавать виртуальную копию физического объекта и синхронизировать ее с реальными данными онлайн.

Цель. Проанализировать применение цифровых двойников в частном домостроении, выявить вызовы цифровизации и определить перспективные направления развития на основе зарубежных исследований и кейсов.

Материалы и методы. Статья основана на зарубежных исследованиях, анализирующих технологическую архитектуру цифрового двойника и необходимые программные и аппаратные компоненты для его создания.

Результаты. Анализ показывает, что создание цифрового двойника требует тщательно собранной базы данных (DataRoom), интеграции сенсоров, IoT-устройств и аналитических инструментов, а также синхронизации данных в реальном времени и обучения AI-модели на основе поведения владельцев. Облачные платформы обеспечивают масштабируемость системы, но существуют и барьеры для внедрения.

Практическая значимость. Статья показывает, что цифровые двойники частных домов становятся частью концепции «умного дома», улучшая эксплуатацию и взаимодействие жильцов. Предлагаются рекомендации по обработке данных в реальном времени, оптимизации эксплуатационных режимов, адаптации управления к поведению собственников и интеллектуальному прогнозированию последствий.

Выводы. Цифровой двойник частного дома занимает важное место в технологическом и социальном

контекстах, трансформируя подходы к строительству и взаимодействию жильцов. Он объединяет функции паспорта, управляющего и аналитика, делая дом умным, адаптивным и безопасным, способным реагировать на внутренние и внешние вызовы, выступая в роли «цифровой тени».

Ключевые слова: цифровизация строительной отрасли, цифровой двойник (DT), цифровые экосистемы, жизненный цикл, модельный уровень, BIM-системы, сенсорный уровень, IoT, BMS (системы управления зданием), искусственный интеллект (AI), облачные платформы, децентрализованные платформы, кибербезопасность, цифровая тень

Для цитирования: Ткаченко В.В. Цифровой двойник частного дома: зарубежные подходы, технологии и перспективы применения в индивидуальном строительстве // Бетон и железобетон. 2025. № 4 (629). С. 73–81. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-73-81](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-73-81). EDN: APJUYJ

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.06.2025

Поступила после рецензирования 04.08.2025

Принята к публикации 07.08.2025

V.V. TKACHENKO

JSC TECHNADZOR, Butlerova str., 17, Moscow, 117342, Russian Federation

DIGITAL DOUBLE OF A PRIVATE HOUSE: FOREIGN APPROACHES, TECHNOLOGIES, AND PROSPECTS FOR INDIVIDUAL CONSTRUCTION

Abstract

Introduction. Digitalization of the construction industry, including individual housing construction, is becoming a global trend. Digital Twin (DT) technology allows to create a virtual copy of a physical object and synchronize it with real data online.

Aim. To analyze the use of digital twins in private housing construction, identify the challenges of digitalization, and determine promising areas of development based on foreign research and case studies.

Materials and methods. The article is based on foreign research analyzing the technological architecture of a digital twin and the necessary software and hardware components for its creation.

Results. The analysis shows that creating a digital twin requires a carefully collected database (DataRoom), the integration of sensors, IoT devices, and analytical tools, as well as real-time data synchronization and AI model training based on the owners' behavior. Cloud platforms provide scalability for the system, but there are also barriers to implementation.

Practical significance. The article shows that digital twins of private homes are becoming part of the smart home concept, improving the operation and interaction of residents. It offers recommendations for real-time data processing, optimizing operational modes, adapting control to the behavior of owners, and intelligently predicting consequences.

Conclusions. The digital twin of a private house occupies an important place in the technological and social context, transforming approaches to construction and resident interaction. It combines the functions of a passport, a manager, and an analyst, making the house smart, adaptive, and secure, capable of responding to internal and external challenges, acting as a "digital shadow".

Keywords: digitalization of the construction industry, digital twin (DT), digital ecosystems, lifecycle, model layer, BIM systems, sensor layer, IoT, BMS (building management systems), artificial intelligence (AI), cloud platforms, decentralized platforms, cybersecurity, digital shadow

For citation: Tkachenko V.V. Digital double of a private house: foreign approaches, technologies, and prospects for individual construction. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 4 (629), pp. 73–81. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4\(629\)-73-81](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-4(629)-73-81). EDN: APJUYJ

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the work on the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 17.06.2025

Revised 04.08.2025

Accepted 07.08.2025

Введение

Цифровизация строительной отрасли стала глобальным трендом, охватывающим как крупные инфраструктурные проекты, так и индивидуальное жилищное строительство. Среди наиболее перспективных и обсуждаемых решений последних лет – технология цифрового двойника (Digital Twin, DT), которая позволяет создавать точную виртуальную копию физического объекта и синхронизировать ее с реальными данными в режиме реального времени.

Первоначально разработанная для нужд аэрокосмической и производственной индустрии концепция DT активно внедряется в строительство, в управление зданиями и эксплуатационное обслуживание. Если на начальном этапе основное внимание уделялось крупным промышленным, коммерческим или государственным объектам, то в последние годы все больше исследователей и разработчиков обращают внимание на потенциал DT в контексте частных домов и малоэтажного жилья [1].

Такой интерес обусловлен сразу несколькими факторами:

- ростом требований к энергоэффективности и устойчивости зданий;
- усложнением инженерных систем даже в стандартных коттеджах;
- повышением цифровой грамотности собственников жилья;
- распространением концепций «умного дома» и интернета вещей (IoT).

Современные частные дома все чаще строятся по принципу интегрированных цифровых экосистем, в которых архитектура, инженерия, эксплуатация и комфорт жильцов рассматриваются в единой логике жизненного цикла. В этом контексте цифровой двойник становится не просто дополнением, а ключевым механизмом управления домом как динамичным объектом, способным к адаптации, анализу и прогнозированию.

Концепция цифрового двойника и ее эволюция

Понятие цифрового двойника (DT) как модели, синхронизированной с реальным объектом и реагирующей на его изменения, было предложено Майклом Гривсом (M. Grieves) в 2002 году во время лекции в Университете Мичигана. Он обсуждал эту концепцию в контексте управления жизненным циклом продукта (PLM). Однако в этой лекции сам термин «Digital Twin» не был использован. Майкл Гривс первоначально только описывал концепцию, а позже стал применять термин «цифровой двойник», впервые употребив термин «**Digital Twin**» в 2011 году в своей работе «**Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management**» [2]. В этой книге он подробно объясняет концепцию цифрового двойника и связывает ее с управлением жизненным циклом продукта (PLM).

Еще одним отцом-основателем «Digital Twin» считают Джона Виккерса (John Vickers) из NASA,

который популяризировал термин в контексте аэрокосмических технологий. Его работа в рамках программы NASA «Model-Based Systems Engineering» в начале 2010-х годов сыграла ключевую роль в закреплении термина.

Впоследствии понятие цифрового двойника (DT) было адаптировано и расширено, охватив не только производственные процессы, но и сложные технические и строительные объекты [3].

Суть концепции заключается в создании виртуального представления объекта (здания, инфраструктуры, системы), которое:

- обновляется в реальном времени на основе поступающих данных;
 - используется для анализа текущего состояния;
 - позволяет моделировать возможные сценарии развития и поведения;
 - включает в себя историю изменений, технические параметры, проектные и эксплуатационные данные.
- Цифровой двойник – это не просто трехмерная модель, а комплексная система, включающая:
- статические данные (BIM-модель, планы, спецификации);
 - динамические данные (с IoT-датчиков, счетчиков, камер и пр.);
 - интеллектуальные алгоритмы (AI, ML, rule-based systems);
 - средства визуализации, управления и анализа [4].

Для частного домостроения это означает возможность управлять зданием как единым интеллектуальным организмом. В отличие от классической BIM-модели, DT предполагает постоянную двухстороннюю связь с физическим объектом, адаптацию под поведение пользователей, прогнозирование рисков и поддержку принятия решений в реальном времени.

Некоторые исследователи подчеркивают, что в контексте частных домов цифровые двойники становятся особенно важны при:

- проектировании «умных» энергоэффективных зданий;
- построении системы превентивного обслуживания;
- оптимизации расходов на содержание дома;
- обеспечении безопасности (в том числе в условиях удаленного мониторинга) [5].

Кроме того, по мнению Калина Бойе (Calin Boje), цифровой двойник позволяет перейти к семантическому управлению объектом, где данные обретают структуру, контекст и используются для автоматизированных решений на всех этапах жизненного цикла дома – от проекта и фундамента до утилизации [6].

На сегодняшний день в мировой научной литературе прослеживается два подхода к построению цифрового двойника в жилой сфере:

- Технический – ориентирован на данные, оборудование, алгоритмы и моделирование.
- Поведенческий – включает анализ предпочтений

жильцов, автоматизацию сценариев, машинное обучение и интерфейсы взаимодействия.

В итоге частный дом с цифровым двойником трансформируется из обычной недвижимости в цифровой сервис, который адаптирован под потребности владельца, управляется в реальном времени и интегрирован в более обширную цифровую инфраструктуру, такую как коттеджные поселки, сообщества жильцов, энергетические сети и другие элементы.

Зарубежные исследования: частный дом в контексте цифрового двойника

Применение цифровых двойников в частном домостроении становится все более популярной темой в зарубежных научных и прикладных исследованиях. Несмотря на то что основные проекты DT были сосредоточены в области промышленного и городского строительства, в последние годы наблюдается системный сдвиг в сторону индивидуального жилья. Это обусловлено развитием IoT, доступностью BIM-средств, распространением интеллектуальных устройств и усилением требований к прочности и энергоэффективности зданий.

Европа: стандарты, энергоэффективность и долговечность

В странах Европейского союза активное продвижение цифровых двойников в частном секторе связано с реализацией программ по декарбонизации и устойчивому строительству. Проекты Horizon, DigiPLACE и ConnectedHome направлены на создание платформ и нормативов для цифровых моделей, охватывающих частные дома.

Так, Ерика Пярн (Erika Pärn) из Бирмингемского городского университета Великобритании подчеркивает, что цифровой двойник позволяет не только повысить эффективность проектирования, но и существенно упростить обслуживание и модернизацию зданий, особенно в условиях перехода к «нулевому потреблению энергии» [7].

В Германии и Нидерландах в рамках национальных программ энергоэффективности внедряются домашние DT-модули, объединяющие BIM-модель с данными от «умных счетчиков», солнечных панелей и климатических систем. Такие модели позволяют:

- следить за утечками тепла и отклонениями от проектных параметров;
- автоматически формировать рекомендации по техобслуживанию;
- обеспечивать соответствие нормативам, включая EU Taxonomy и ESG-параметры.

Особое внимание уделяется адаптации зданий к климатическим изменениям. В совместном исследовании ученых из Дублинского университета (Ирландия) рассматривается сценарий использования DT для оценки поведения дома в экстремальных условиях: жара, ливнях, сильном ветре. DT анализирует термическую

инерцию, поведение окон и кровли, предлагая корректировки в эксплуатации [8].

США и Канада: эксплуатация, страхование и жизненный цикл

В североамериканском контексте основное внимание уделяется управлению жизненным циклом здания (Life-Cycle Management) и страховым аспектам. Национальный институт стандартов и технологий NIST разработал фреймворк цифрового двойника для «умного дома», включающий:

- интеграцию с голосовыми ассистентами (Alexa, Google Home);
- поддержку аварийного реагирования;
- контроль за критическими элементами инженерии (отопление, электрика, газ) [9].

Также DT используется как прозрачная среда для оценщиков и страховых компаний. Цифровой двойник позволяет зафиксировать состояние дома при покупке, во время эксплуатации и после аварий, что существенно упрощает расчеты страховых выплат [10].

Особый интерес представляет проект Smart Home Digital Twin Lab от лаборатории Массачусетского технологического института (MIT Media Lab), где изучается поведение жильцов в разных сценариях:

- как меняется тепловой баланс при различных привычках (открытие окон, режимы сна);
- как автоматизированные сценарии влияют на комфорт и потребление энергии;
- как можно адаптировать дом под пожилых людей и людей с ограниченной мобильностью [11].

Азия и Австралия: адаптация и устойчивые поселения

В странах Азии DT рассматривается как ключ к повышению устойчивости зданий к природным катастрофам и демографическим вызовам. В Южной Корее и Японии разработаны прототипы «антикризисных двойников», способных:

- предупреждать о повышении сейсмической активности;
- автоматически отключать системы при аварии;
- поддерживать цифровой профиль семьи и потребностей жильцов.

Автор-корреспондент Сянью Ван (Xiangyu Wang) показывает, что DT может стать инструментом «гибкого домостроения» – когда дом проектируется и эксплуатируется с учетом возможных трансформаций: разделение на квартиры, переезд семьи, адаптация под инвалидность [12].

В Австралии университет RMIT University разработал модель цифрового двойника, встроенную в экосистему устойчивого поселка (города), где каждый дом имеет свою цифровую сущность, а все вместе образуют «цифровую деревню». Это позволяет:

- координировать энергопотребление;
- оптимизировать полив, освещение и охрану;

– делать прогнозы на уровне не одного дома, а целого поселка (города) [13].

В работе ученых Университета Бургундии (Европа) акцентируется необходимость интероперабельности DT: все модели должны «разговаривать» на одном языке, использовать общие протоколы и быть понятны как для жильцов, так и для системного управления городом [14].

Технологическая архитектура и инструменты

Создание цифрового двойника частного дома требует интеграции различных программных, аппаратных и аналитических компонентов в единую экосистему, которая способна функционировать в реальном времени, адаптироваться к условиям и обеспечивать двустороннюю связь между физическим и виртуальным объектами. Зарубежные исследования выделяют несколько ключевых уровней архитектуры DT: модельный, сенсорный, вычислительный, аналитический и пользовательский.

Модельный уровень: BIM и 3D-репрезентация

На первом этапе создается цифровая модель дома – это может быть как стандартная BIM-модель (например, в Revit, ArchiCAD или SketchUp), так и упрощенное 3D-представление, интегрированное с данными о материалах, геометрии, инженерных системах.

Цифровой двойник требует большего объема данных, чем классическая BIM-модель на стадии проектирования объекта, и по сути является симбиозом двух BIM-моделей объекта: проектной и эксплуатационной, поскольку в его рамках необходимо учитывать поведение конструкций, изменение состояния во времени и взаимодействие с внутренними системами и с внешней средой.

Исследование Бойе Калина (Boje Calin) подчеркивает, что семантическое обогащение модели (например, через IFC) позволяет задать правила, зависимости и контекст для анализа.

В контексте частных домов особое значение приобретают:

- модели интерьеров (для автоматизации сценариев и расчета освещенности);
- представление внешней среды (участок, климат, ориентация по сторонам света);
- визуализация истории изменений (ремонт, перепланировка, модернизация) [6];
- поведенческие особенности обитателей;
- медицинские аспекты жизни собственников.

Сенсорный уровень: IoT, BMS и цифровое восприятие

Цифровой двойник становится «живым», когда в систему поступают данные от физических источников. Это достигается за счет внедрения сенсоров и устройств IoT, охватывающих:

- температуру, влажность, освещенность, CO₂;

- движение, открытие окон и дверей;
- потребление воды, электроэнергии, газа;
- состояние инженерных узлов (насосы, котлы, электрошиты).

По Юэ Пану (Yue Pan) интеграция с системой BMS (Building Management System) обеспечивает централизованный контроль, а подключение к облачным платформам (например, Azure Digital Twins, Siemens Mindsphere) позволяет масштабировать решения и использовать AI-аналитику.

Реализация в частном секторе все чаще основана на открытых протоколах: MQTT, BACnet, Zigbee, Thread, Modbus, KNX, LON, что упрощает подключение сторонних устройств и снижает стоимость системы. При этом важно учитывать кибербезопасность, особенно если данные передаются за пределы локальной сети [15].

Аналитика и интеллект: AI/ML, предиктивные модели

Сбор данных сам по себе не дает эффекта без аналитического уровня. Зарубежные решения активно используют методы машинного обучения и предиктивной аналитики:

- алгоритмы прогнозирования выхода из строя инженерных систем;
- обнаружение аномалий (например, резкого роста потребления воды);
- поведенческий анализ жильцов для автоматизации (расписание, привычки).

По данным статьи «Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends» [16], в ряде американских проектов применяется гибридная логика: заранее заданные сценарии + обучение на данных. Это позволяет быстро стартовать, а затем персонализировать систему под конкретного пользователя.

Важным трендом становится сценарная адаптация – система не только реагирует, но и предлагает варианты: например, на основе прогноза погоды и привычек жильцов – заранее прогревает дом или включает приточную вентиляцию.

Облачные и децентрализованные платформы

Облачные хранилища и вычислительные платформы обеспечивают масштабируемость, хранение истории и подключение внешних сервисов (например, цифрового паспорта объекта, страховой платформы, технадзора).

Примеры платформ, применяемых в зарубежных проектах:

- **Azure Digital Twins** – гибкая платформа от Microsoft для управления виртуальными копиями;
- **Autodesk Tandem** – BIM-среда для создания DT на основе Revit и IFC;
- **Home Assistant / openHAB** – open-source системы, используемые для локального управления с возможностью интеграции с DT.

В статье [14] подчеркивается важность интероперабельности – способность обмениваться данными между платформами, независимость от конкретного вендора, поддержка открытых стандартов. Особенно актуально это для малых домов, где владелец хочет избежать «привязки» к одному поставщику решений.

Интерфейсы: голос, AR, визуализация

Пользовательский уровень – один из наиболее быстро развивающихся. DT в частном доме должен быть **интуитивно понятным** и доступным жильцам без специальных знаний.

Реализуются следующие интерфейсы:

- **голосовые ассистенты** (Alexa, Siri, Google) – контроль климата, света, доступа;
- **AR/VR-решения** – визуализация ремонта, прокладок коммуникаций, истории изменений;
- **мобильные приложения** – отчеты, уведомления, сценарии, контроль доступа;
- **графики, дашборды, тепловые карты** – аналитика в реальном времени.

Исследование Smart Home Digital Twin Lab – MIT подчеркивает, что интерфейс DT должен быть пользовательски ориентированным, адаптироваться к возрасту, поведению, языковым предпочтениям владельца [11].

Актуальные вызовы и барьеры

Несмотря на очевидные преимущества, цифровые двойники частных домов сталкиваются с рядом технических, организационных, экономических и этических препятствий, замедляющих их широкое внедрение. Зарубежные исследования подчеркивают, что эти барьеры особенно критичны в индивидуальном строительстве, где отсутствует централизованный заказчик и единые цифровые стандарты.

Отсутствие нормативной и методической базы

Международные стандарты, такие как ISO 16739 (IFC), и национальные стандарты (например, BS ISO в Великобритании или DIN в Германии) задают требования к цифровым информационным моделям коммерческих и инфраструктурных объектов. Однако для частных домов отсутствуют универсальные стандарты и обязательные требования, что создает пробелы в регулировании их проектирования и строительства.

Согласно исследованиям Мохамеда Кассема (Mohamad Kassem) и Билала Суккара (Bilal Succar), даже в высокоразвитых странах с высоким уровнем цифровизации, таких как Великобритания, Германия и США, не существует унифицированных методик, касающихся структуры цифровых двойников (DT) частных домов, включая определение необходимых данных, обеспечение их актуальности и распределение ответственности за сопровождение цифровой модели [17].

В результате каждый разработчик предлагает собственную архитектуру, что снижает совместимость,

усложняет миграцию данных и затрудняет объединение моделей в масштабах поселков и районов.

Высокая стоимость внедрения и поддержки

Хотя базовые BIM-модели и IoT-решения становятся все более доступными, создание полноценного цифрового двойника с аналитикой, визуализацией и обратной связью требует значительных инвестиций. Особенно это касается:

- установки и калибровки сенсорной сети;
- разработки индивидуальной логики сценариев;
- интеграции с уже существующими системами «умного дома»;
- поддержки облачной инфраструктуры и кибербезопасности.

Ученые в исследованиях подчеркивают, что для частных владельцев важна экономическая целесообразность: DT должен окупаться за счет снижения эксплуатационных расходов, повышения стоимости дома при продаже или страховке. Однако в большинстве случаев окупаемость достигается только при долгосрочном планировании, что не всегда соответствует ожиданиям пользователей [18].

Особенно дорого обходится ретрофит (доработка и модернизация) уже существующих домов. Встраивание сенсоров, оцифровка планов, диагностика инженерии и визуализация отделки могут быть сложны и затратны, особенно без поддержки государства или субсидий.

Кибербезопасность и приватность данных

Цифровой двойник оперирует большим объемом персонализированных и технических данных, включая:

- поведение жильцов, их маршруты, графики и предпочтения;
- сведения о конструкциях, инженерных системах, уязвимостях;
- информацию, интересную злоумышленникам (например, длительное отсутствие жильцов).

Внедрение DT требует соблюдения норм по защите данных (например, GDPR в ЕС или CCPA в Калифорнии), а также технической защиты от взломов, утечек, несанкционированного доступа. При этом, как показывает исследование ученых из Университета Западного Сиднея, большинство решений на рынке не обеспечивают достаточного уровня изоляции и шифрования, особенно в бюджетных решениях [19].

Проблема усугубляется тем, что многие владельцы не обладают достаточной цифровой грамотностью для настройки прав доступа, обновлений и безопасного подключения устройств.

Недоверие и слабая вовлеченность пользователей

Психологический и поведенческий барьер тоже значим. Многим владельцам трудно доверить системе с AI и машинным обучением контроль за своим домом.

Особенно в старших возрастных группах распространено мнение, что «дом должен подчиняться человеку, а не наоборот».

Smart Home Digital Twin Lab – MIT фиксирует, что ключевым фактором является прозрачность интерфейса и обучаемость системы [11]. Владельцы хотят видеть, почему система принимает то или иное решение, как ее можно настроить под свои нужды, какие данные она собирает.

Также важен вопрос удобства, так как слишком сложные настройки, перегруженные интерфейсы и отсутствие единого приложения отпугивают пользователей. Особенно это актуально в домах, где проживает несколько поколений, каждое из которых взаимодействует с технологией по-разному.

Недостаток специалистов и экосистемы

Даже при желании внедрить DT многие владельцы сталкиваются с нехваткой специалистов: проектировщиков, разработчиков сценариев, инженеров по данным и т.д. На рынке мало предложений, ориентированных именно на частный сектор, большинство решений разрабатывается под коммерческую недвижимость или промышленность.

Ученые из различных университетов (Новой Зеландии, Канады и США), ведущие исследования в этой области, подчеркивают, что формирование зрелой экосистемы вокруг DT требует:

- готовых модулей «под ключ» (например, цифровой паспорт, термомодель, графики обслуживания);
- интеграции с уже существующими сервисами (управляющие компании, страховые, госуслуги);
- образовательных программ для архитекторов, строителей и владельцев [20].

Перспективы развития

Несмотря на существующие препятствия, цифровые двойники частных домов все чаще рассматриваются в международной литературе не как автономная технология, а как элемент более широкой экосистемы «умного и устойчивого жилья». Ученые и разработчики единодушны в том, что ближайшие годы станут периодом перехода от экспериментальных решений к полноценным платформенным моделям, доступным для широкого круга потребителей.

Расширение масштаба: от дома к цифровому району

Одним из главных векторов развития станет интеграция DT в масштабе нескольких объектов, формирующих цифровую сеть поселков, районов и даже городов. В рамках проектов типа DigiPLACE [21] цифровые двойники частных домов объединяются в единую платформу, что позволяет:

- синхронизировать управление ресурсами (тепло, вода, электричество);
- координировать ремонты и технические работы;

– повысить безопасность и мониторинг на уровне квартала;

– формировать коллективные сценарии реагирования на ЧС.

Такой подход особенно актуален в малоэтажной застройке с единым девелопером или управляющей компанией, где единая цифровая инфраструктура позволяет формировать «цифровой поселок» с возможностью масштабирования и адаптации.

Эволюция автономных домов

Цифровые двойники становятся основой для создания автономных, самоуправляемых домов, где AI-система не только управляет оборудованием, но и самостоятельно принимает решения на основе долгосрочного анализа поведения жильцов и внешних факторов (погоды, цен на энергию, расписаний).

Примером могут служить проекты двух университетов MIT и UC Berkeley по внедрению цифровых двойников, которые:

- автоматически переносят работу энергосистем в часы низкой нагрузки;
- обновляют сценарии на основе моделей машинного обучения;
- интерпретируют голосовые команды и подстраивают алгоритмы без участия пользователя (Smart Home Digital Twin Lab – MIT) [11].

Такой дом способен «предугадывать» желания жильцов, оптимизировать расходы и обеспечивать максимальный комфорт при минимуме ручного управления.

Интеграция с зелеными стандартами и ESG

С ростом интереса к устойчивому строительству цифровые двойники все чаще рассматриваются как инструмент достижения стандартов:

- **LEED, BREEAM, WELL** – через контроль за микроклиматом, освещенностью, ресурсами;
- **ESG** – предоставляя прозрачную отчетность по эксплуатации дома;
- **Zero Carbon Homes** – благодаря прогнозированию углеродного следа и оптимизации энергопотребления [19].

Цифровой двойник помогает не только построить дом по зеленому стандарту, но и поддерживать соответствие в течение всего срока службы, обеспечивая владельца и общество надежной экологической информацией.

Новые интерфейсы и метаверс-экосистемы

С развитием технологий визуализации (VR/AR) и метавселенных цифровые двойники начинают интегрироваться в виртуальные среды, где владелец может:

- управлять домом в формате геймифицированного интерфейса;
- планировать ремонт, перестановку мебели или ландшафтный дизайн в дополненной реальности;

– просматривать показатели, историю и прогнозы в иммерсивной 3D-среде.

Исследования Юэ Пан (Yue Pan) и Марио Челси (Mario Chelse) показывают, что такие подходы повышают вовлеченность пользователей, особенно молодого поколения, и формируют цифровую идентичность дома, которую можно даже передавать при продаже объекта [15].

Заключение

Цифровой двойник частного дома в зарубежном освещении занимает все более значимое место как с технологической, так и с социальной точки зрения. Если еще 5–10 лет назад DT воспринимался как инструмент для промышленных и инфраструктурных объектов, то сегодня он активно осваивает индивидуальный сектор, трансформируя подход к проектированию, эксплуатации и взаимодействию с домом.

На основе обширного анализа научной литературы можно сделать следующие выводы:

– **DT для частного дома – это не просто модель**, а целостная экосистема, включающая BIM, IoT, AI и интерфейсы взаимодействия;

– **потенциал применения чрезвычайно высок**, особенно в аспектах энергоэффективности, устойчивости, комфорта и стоимости владения. Современный цифровой дневник начинает становиться цифровым мозгом дома, объединяющим функции паспорта, управляющего, помощника, сервисной службы и аналитика. Он должен не просто фиксировать данные, а делать дом умным, адаптивным, долговечным и безопасным, реагирующим на внутренние проблемы и внешние вызовы как по разработанным сценариям, так и интеллектуально;

– **основные барьеры** – нехватка стандартов (хотя они есть в ISO и наших национальных ГОСТ Р), именно для частного домостроения, высокая стоимость создания, кибер-риски и слабая вовлеченность пользователей постепенно преодолеваются за счет широкого вовлечения все новых и новых компаний в разработку и распространение практики цифровых двойников с промышленности и крупных инфраструктурных объектов на сектор частных домов;

– **будущее за платформенными и автономными решениями**, позволяющими каждому дому стать частью цифровой среды – умной, адаптивной и прозрачной.

Таким образом, цифровые двойники частных домов – это уже не гипотеза, а реальность, начало реализации которой положено в передовых странах и компаниях.

И вот живые примеры:

– **Spotscale (Швеция)** – производитель цифровых двойников на основе дрон-съемки для Riksborgen;

– **Skanska (Финляндия)** внедрила цифровую модель ЖК Sampo с функционалом мониторинга проживания;

– **NNTC (ОАЭ)** – партнер Abu Dhabi Housing Authority

в проекте цифровых двойников массового жилья;

– **TNO и Scenexus (Нидерланды)** разработали региональную платформу для моделирования жилищного роста;

– **AIM Housing (Великобритания)** – коммерческий продукт для цифровых двойников арендуемого жилья;

– **Arup (международная инженерная компания)** предлагает «Neuron» – платформу цифровых двойников зданий для оптимизации энергопотребления;

– **Granlund (Финляндия)** – система «Granlund Manager's Digital Twin»;

– **Autodesk** – облачная платформа для жизненного цикла зданий «Autodesk Tandem»;

– **Siemens** – система «Building Twin» для мониторинга и управления зданиями;

– **Bosch** использует Azure Digital Twins для подключенных зданий;

– **Catenda** – платформа Bimsync Arena для BIM поддержки цифровых двойников.

Перспективы в ближайшие годы

Массовое внедрение: энергетический аудит, мониторинг потребления, визуализация, обслуживание, оптимизация смарт-функций.

Расширение: с крупных ЖК на отдельные частные дома – технология становится более доступной и миниатюризируется.

Коммерциализация: продукты для владельцев и управляющих (например, от Granlund, Autodesk, Siemens) – переход от пилота к массовым продажам.

Законодательная поддержка: например, во ФРГ и Великобритании законы требуют цифровую документацию для жилья, там цифровые двойники станут стандартом.

Таким образом, цифровые двойники частных домов – это реальность, уже внедренная в Швеции, Финляндии, ОАЭ, Великобритании и Нидерландах. Конкретные цифры (5 000 квартир, 3 000 домов, 62 000) – это не гипотеза, а активно реализуемые кейсы. Их широкое внедрение в ближайшие годы станет неотъемлемой частью цифровой трансформации жилищного фонда.

Список литературы / References

1. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2018, vol. 48, pp. 157–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>.
2. Grieves M. *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*. 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/274835788_Virtually_Perfect_Driving_Innovative_and_Lean_Products_through_Product_Lifecycle_Management.
3. Tao F., Zhang M., Nee A. *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press, 2019, 282 p. ISBN: 978-0-12-817630-6.

4. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 108952–108971. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
5. Zhou Y., Chao T., Zhang T., Tongrui Z., Zhang Z. Digital Twins in Construction: Architecture, Applications, Trends and Challenges. *Buildings*. 2024, vol. 14, no. 9, article number 2616. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14092616>.
6. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*. 2020, vol. 114, no. 3, p. 103179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>.
7. Pärn E., Edwards D., Sing M.C.P. The building information modelling trajectory in facilities management: A review. *Automation in Construction*. 2017, vol. 75, no. 3, pp. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.12.003>.
8. Considine B., McNabola A., Kumar P., Gallagher J. A numerical analysis of particulate matter control technology integrated with HVAC system inlet design and implications on energy consumption. *Building and Environment*. 2022, vol. 211, article number 108726. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108726>.
9. NIST Advanced Manufacturing Series 400–2. Use Case Scenarios for Digital Twin Implementation Based on ISO 23247. National Institute of Standards and Technology Advanced Manufacturing Series 400–2. May, 2021, 30 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.400-2>.
10. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H., Girolami M. Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*. 1: e14. DOI: <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>.
11. Smart Home Digital Twin Lab — MIT Media Lab. Creating “digital twins” at scale. Model could help predictive virtual models become standard practice in engineering. Becky Ham | Department of Aeronautics and Astronautics. Publication Date: June 14, 2021 [интернет]. URL: <https://news.mit.edu/2021/creating-digital-twins-scale-0614> (дата обращения: 20.05.2025).
12. Wang J., Wu P., Wang X., Shou W. The outlook of blockchain technology for construction engineering management. *Frontiers of Engineering Management*. 2017, vol. 4, no. 1, pp. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2017006>.
13. Mojtaba Mahmoodian, Kevin (Guomin) Zhang, Sujeeva Setunge Digital twins can help monitor infrastructure and save us billions. Creating a digital twin of infrastructure or services makes them easier to monitor and operate safely. RMIT University. Publication Date: June 29, 2020 [интернет]. URL: <https://www.rmit.edu.au/news/all-news/2020/jun/digital-twins-can-help-monitor-infrastructure> (дата обращения: 20.05.2025).
14. Roxin A., Abdou W., Derigent W. Interoperable digital building twins through communicating materials and semantic BIM. *SN Computer Science*. 2022, vol. 3, article number 23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00860-w>.
15. Pan Y., Zhang L., Chelse M. Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023, vol. 30, pp. 1081–1110. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09830-8>.
16. Bilal M., Oyedele L.O., Qadir J., Munir K., Ajayi S.O., Akinade O.O., Owolabi H.A., Alaka H.A., Pasha M. Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends. *Advanced Engineering Informatics*. 2016, vol. 30, no. 3, pp. 500–521. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2016.07.001>.
17. Kassem M., Succar B. Macro BIM adoption: Comparative market analysis. *Automation in Construction*. 2017, vol. 81, pp. 286–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2017.04.005>.
18. Piras G., Agostinelli S. Digital Twins for Built Environment. A Review on Key Enablers. *Energies*. 2024, vol. 17, no. 2, article number 436. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17020436>.
19. De-Graft Joe Opoku, Srinath Perera, Robert Osei-Kyei, Maria Rashidi, Tosin Famakinwa, Keivan Bamdad. Drivers for Digital Twin Adoption in the Construction Industry: A Systematic Literature Review. *Buildings*. 2022, vol. 12, no. 2, article number 113. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12020113>.
20. GhaffarianHoseini A., Tookey J., GhaffarianHoseini A. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, vol. 75, pp. 1046–1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>.
21. Digital Platform for Construction in Europe. CORDIS — EU research results. Publication Date: 12 December 2023 [интернет]. DOI: <https://doi.org/10.3030/856943>. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/856943> (дата обращения: 20.05.2025).

Информация об авторе / Information about the author

Виталий Владимирович Ткаченко, канд. экон. наук, генеральный директор, АО «ТЕХНАДЗОР», Москва
e-mail: Vvtkachenko@mail.ru
Vitaly V. Tkachenko, Cand. Sci. (Economic), General Director, JSC TECHNADZOR, Moscow
e-mail: Vvtkachenko@mail.ru