

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК: ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Д. А. Сосфенов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: dmitral@yandex.ru

Аннотация. В современном мире с наступлением четвертой промышленной революции предприятия стремятся повысить уровень эффективности своей деятельности с помощью внедрения информационных технологий нового поколения, активно набирающих популярность. Применение таких технологий позволяет компаниям повысить эффективность работы производственных и управленческих процессов. Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель того или иного физического объекта, которая помогает высокотехнологичным предприятиям выходить на новый этап технологического развития и повышать конкурентоспособность на рынке. В статье рассмотрены этапы развития данной технологии, начиная с момента зарождения концепции как идеи, и до применения ее в различных сферах промышленности в нынешнее время.

Основной целью данной статьи является оценка перспектив развития концепции цифровых двойников на основе изучения ее зарождения и эволюции развития. В работе анализируются научные труды, посвященные цифровизации экономики и, в частности, развитию технологии цифровых близнецов. В статье представлен обзор появления и развития концепции цифровых двойников, рассмотрен опыт ее внедрения в промышленности. Кроме того, проанализирован уровень развитости технологии на сегодняшний день и сформировано представление о дальнейших перспективах развития технологии, исходя из выводов, полученных на основании анализа истории концепции. Основные результаты работы заключаются в формировании хронологии развития концепции и выявлении потенциала дальнейшего распространения и популяризации применения технологии цифровых двойников. По результатам исследования было выявлено, что ввиду активно развивающейся сферы информационных технологий и цифровизации экономики, в ближайшее время популярность цифровых двойников будет только возрастать. Предприятия, которые стремятся оптимизировать внутренние процессы и выйти на новый уровень технологического развития, начнут все чаще применять технологию, поскольку текущие результаты компаний, уже применяющих технологию цифровых двойников, говорят об их эффективности и пользе для производственных результатов.

Для исследования были использованы такие методы, как анализ и обобщение данных научной литературы, а также метод историзма и графический метод исследования процесса развития изучаемого объекта. Работа написана на основании результатов научных работ российских и зарубежных авторов и ученых.

Ключевые слова: цифровой двойник, индустрия 4.0, информационные технологии, виртуальное пространство, цифровизация, цифровая трансформация.

Для цитирования: Сосфенов Д. А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 4. – С. 35–43, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-35>.

Original article

DIGITAL TWIN: HISTORY OF ORIGIN AND DEVELOPMENT PROSPECTS

D. A. Sosfenov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
e-mail: dmitral@yandex.ru

Abstract. In the modern world, with the advent of the fourth industrial revolution, enterprises are striving to increase the level of efficiency of their activities through the introduction of new generation information technologies that are actively gaining popularity. The use of such technologies allows companies to increase the efficiency of production and management processes. A digital twin is a virtual model of a physical object that helps high-tech enterprises enter a new stage of technological development and increase their competitiveness in the market. The article discusses the stages of

development of this technology, starting from the moment the concept was born as an idea, and up to its application in various industries at the present time.

The main purpose of this article is to assess the prospects for the development of the concept of digital twins based on the study of its origin and evolution of development. The paper analyzes scientific works on the digitalization of the economy and, in particular, the development of digital twin technology. The article provides an overview of the emergence and development of the concept of digital twins, and considers the experience of its implementation in industry. In addition, the level of technology development to date is analyzed and an idea is formed about the further prospects for the development of technology, based on the conclusions obtained based on the analysis of the history of the concept. The main results of the work are to form a chronology of the development of the concept and to identify the potential for further distribution and popularization of the use of digital twin technology. According to the results of the study, it was revealed that in view of the actively developing field of information technology and the digitalization of the economy, in the near future the popularity of digital twins will only increase. Businesses looking to streamline internal processes and advance to the next level of technological development will increasingly adopt the technology as current results from companies already adopting digital twin technology speak to their effectiveness and value to operational outcomes.

Key words: digital twin, industry 4.0, information technology, virtual space, digitalization, digital transformation.

Cite as: Sosfenov, D. A. (2023) [Digital twin: history of origin and development prospects]. *Intellect. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 4, pp. 35–43, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-35>.

Введение

Цифровой двойник (Digital Twin) – это современная концепция информационных технологий, которая набирает популярность вместе с развитием Индустрии 4.0. Она становится все более значимой в промышленности и привлекает внимание многих отраслей. Технология может стать отличным инструментом для компаний, позволяющим повысить свою конкурентоспособность, производительность и эффективность.

Данная работа посвящена исследованию технологии цифрового двойника с точки зрения истории ее развития. В статье рассмотрены этапы формирования концепции, начиная с зарождения идеи, заканчивая описанием состояния технологии цифровых двойников, актуального на сегодняшний день. Кроме того, приведены прогнозы дальнейшего развития технологии в ближайшем будущем.

В статье предлагается рассмотреть вопросы, связанные с предпосылками возникновения данной технологии, описанием первых цифровых двойников и их предшественников в научных трудах, возникновением понятия «цифровой двойник», началом практического применения технологии в промышленности, уровнем развития цифровых двойников на данный момент, а также имеющимся потенциалом его развития.

Основная цель работы – оценить перспективы развития технологии цифровых двойников, исходя из текущего опыта применения и с учетом имеющегося уровня цифровизации и интеграции информационных технологий в промышленности.

Поставленные в работе задачи были решены на основании изучения различных источников инфор-

мации и анализа собранных данных с последующими выводами. Источниками информации являлись научные труды ученых, информационные отчеты и статистические исследования.

Предпосылки возникновения цифровых двойников

Не так давно, во времена второй промышленной революции, ключевая роль в промышленности была отведена физическому пространству. Тогда люди, которые находились на небольшом расстоянии друг от друга, могли вместе создавать те или иные физические объекты с целью решения важных задач проектной и производственной деятельности. Но на пути повышения уровня производительности и эффективности промышленных предприятий в целом часто возникали довольно существенные преграды в виде географических ограничений и разного рода функциональных трудностей аналоговых технологий.

Третья промышленная революция второй половины 20 века принесла возможность создавать параллельно физическому еще и виртуальное пространство благодаря разнообразным новейшим инструментам моделирования, появившимся компьютерам и сети Интернет. Такое пространство позволяло создавать виртуальные активы и производить работу с ними при помощи мощных вычислительных средств, предоставляло доступ к ним с помощью удаленного взаимодействия. Несомненно, появление возможности создания виртуального пространства позволило значительно повысить эффективность производственной деятельности.

На сегодняшний день мы имеем дело с четвертой промышленной революцией. В сфере информацион-

ных технологий нового поколения (большие данные, облачные вычисления, Интернет вещей, искусственный интеллект) наблюдается стремительное развитие, а виртуальное пространство приобретает все большую значимость в различных сферах деятельности людей. Можно отметить тот факт, что возможность бесшовной интеграции двух пространств становится основным вектором развития для промышленных производств, а в кибер-физическом синтезе кроется новый потенциал для повышения эффективности промышленных компаний на всех стадиях производства.

Технология цифровых двойников является технологией-интегратором. Она представляет собой технологию-драйвер, позволяет обеспечить технологические прорывы и помогает предприятиям выходить на новый этап развития и завоевывать лидерство на международных рынках.¹

История развития цифровых двойников

В последнее время, с появлением информационных технологий нового поколения, цифровые двойники становятся все более популярными. Однако сама концепция не является новой, ее первоначальное описание встречается в литературе еще начиная с 20 века. Она была впервые описана Майклом Гривзом в рамках управления жизненным циклом продукта (PLM) в 2002 году в Мичиганском университете [10]. Предложенная модель включала в себя реальное и виртуальное пространство, а также связующий механизм для обмена информацией между ними. Вскоре модель стала называться «Модель зеркальных пространств». Похожая технология присуща «Зеркальным мирам», которые были представлены Дэвидом Гелернтером в 1991 году. Концепция представляла собой некие модели, имитирующие физическое пространство, опираясь на данные из реального мира. В работе Кэри Фрамлинга, Яна Холмстрема, Тимо Ала-Риску, Микко Карккайнена [9] было предложено решение проблемы неэффективности передачи данных производства для управления жизненным циклом продукта на бумаге. Решение представляло собой модель, в которой у всех элементов продукта существуют виртуальные аналоги. Позднее, в 2006 году, «Модель зеркальных пространств» Майкла Гривза стала называться «Моделью зеркалирования информации». Акцент в модели был сделан на том, что для одного реального пространства

существует несколько виртуальных аналогов, которые позволяют производить исследования объектов. В условиях низкого уровня технологического развития, на тот момент сам цифровой двойник не имел возможности применяться в практической деятельности [15].

Термин «цифровой двойник» был впервые представлен широкой публике в 2010 году в дорожной карте интегрированных технологий НАСА в области технологий: моделирование, информационные технологии и обработка. Он был описан так: «Цифровой двойник – это интегрированная мультифизическая, многомасштабная симуляция транспортного средства или системы, в которой используются наилучшие доступные физические модели, обновления датчиков, история парка и т. д., чтобы отразить жизнь соответствующего летающего близнеца» [14]. В 2014 году был опубликован технический документ по использованию цифровых двойников, и трехмерная модель для представления их структуры стала широко обсуждаться в научном сообществе.

Более современное определение цифрового двойника в литературе дано Старком и Дамеру в 2019 году, оно звучит как «...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» [16].

Ссылаясь на определение НАСА, наиболее важной характеристикой цифрового двойника было создание наиболее точного виртуального представления реального физического продукта. Большинство публикаций придерживаются этого определения, стремясь к большей конвергенции реального и виртуального пространства. Хотя большинство публикаций сходятся во мнениях относительно виртуального пространства, они расходятся в отношении реального пространства. Некоторые подразумевают под реальным пространством непосредственно продукцию, некоторые рассматривают в качестве реального пространства активы компании. Другие расширяют понятие еще дальше и включают в свое рассмотрение целые системы.² Согласно Куну (2017) [11], помимо физических продуктов, близнец также может представлять нефизические «вещи», такие как услуги.

¹ Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации: офиц. Сайт. – 2019. – URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019npt.pdf> (дата обращения: 15.04.2023).

² Trauer J. et al. (2020). What is a digital twin? – Definitions and insights from an industrial case study in technical product development. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*. Vol. 1, pp. 757–766, <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.15>.

Таким образом, в литературе существует множество различных определений термину «цифровой двойник». Обобщая, можно сказать, что это некая виртуальная модель физического объекта, с которым происходит автоматический взаимообмен данными и информацией, способствующий нахождению проблем и поиску их решений.

Концепция использования «двойников» начала применяться задолго до появления вышеуказанного понятия. Впервые технология была использована в программе НАСА «Аполлон», где были построены как минимум два идентичных космических корабля, чтобы можно было отражать его состояние во время миссии. Один корабль, оставшийся на земле, был назван близнецом. Двойник широко использовался для тренировок во время подготовки к полету. Во время полетной миссии он был задействован для моделирования альтернатив на земной модели, где доступные полетные данные использовались для максимально точного отражения условий полета и, таким образом, помогали астронавтам на орбите в критических ситуациях. С этой точки зрения, каждый вид прототипа, использующийся для отражения реальных условий работы и для моделирования поведения объекта в реальном времени, можно рассматривать как близнеца.

Другой формой «аппаратного» близнеца является «Железная птица» – наземный инженерный инструмент, используемый в авиационной промышленности

для интеграции, оптимизации и проверки жизненно важных авиационных систем [5]. В связи с возрастающей мощностью технологий моделирования все больше и больше физических компонентов заменяется виртуальными моделями в Iron Bird.

Это позволяет использовать концепцию Iron Bird в более ранних циклах разработки, даже когда некоторые физические компоненты еще недоступны. Дальнейшее распространение этой идеи на все фазы жизненного цикла приводит к полной цифровой модели физической системы: цифровому двойнику [13].

Стоит отметить, что в отличие от развития цифрового двойника как идеи, его применение на практике начало происходить немного позже ввиду недостаточного развития информационных технологий. В 2011 году Военно-воздушные силы США применили данную технологию для решения таких задач, как проведение технического обслуживания и расчет прогнозного срока службы самолетов [6]. К 2025 г. планируется разработать полноценный цифровой двойник космического аппарата, то есть аппаратный «близнец», существовавший во времена проекта «Аполлон», перерастет уже в цифрового близнеца, который будет полномасштабно отражать состояние объекта [2].

Таким образом, для наглядности можно представить хронологию развития концепции цифрового двойника с прогнозом на будущее в виде схемы на Рисунке 1.



Рисунок 1. Хронология развития цифрового двойника

Источник: разработано автором

Историю развития цифрового двойника можно условно разделить на 3 этапа:

1. Зарождение концепции цифрового двойника (1991–2010 гг.).
2. Постепенное начало разработки и применения данной технологии в высокотехнологичной промышленности (2010–2014 гг.).
3. Повсеместное распространение цифровых двойников и использование их в новых отраслях экономики (2014 г.-наши дни).

Использование цифровых двойников в наши дни

Современное использование концепции цифровых двойников основано на модели, в которой присутствует как физическая, так и виртуальная среда, в которой объекты обмениваются между собой данными и информацией. В данном случае физическая среда относится к реальному миру, в котором, в свою очередь, расположен исследуемый физический объект. К виртуальному миру относится цифровая среда, которая включает в себя цифровые модели физических объектов, а также некую базу данных с информацией об объекте. Применение физических процессов популярно среди производственных систем на предприятиях. Виртуальные системы распространены в процессах, связанных с моделированием и оптимизацией, а также часто применяется при диагностике здоровья [8].

Метод цифровых двойников обладает большей эффективностью на предприятиях таких отраслей, которым присущ продолжительный жизненный цикл продукции, труднодоступное техническое обслуживание, а также высококвалифицированный сервис. Для того, чтобы внедрить технологию в производство, необходимо начать с создания цифрового двойника отдельной единицы оборудования или какого-то производственного процесса. В случае успешного применения такого двойника, можно развивать использование концепции для более масштабных объектов. На каждом этапе его внедрения необходимо отслеживать и выявлять возникающие проблемы с целью их устранения при расширении процесса цифрового моделирования предприятия.³

Использование цифровых двойников дает предприятиям множество преимуществ. Использование виртуализации позволяет повышать наглядность и прозрачность операций, отслеживать поведение отдельных устройств системы производства, оптими-

зировать безопасность и эргономику рабочей среды и многое другое [12].

Сегодня компании используют возможности цифровых двойников различными способами. В автомобильном и авиационном секторах они становятся важными инструментами для оптимизации всей цепочки создания стоимости и разработки инновационных продуктов. Технология цифровых двойников используется при проектировании, в процессе производства и эксплуатации различных деталей и конструкций, таких как двигатели, шасси, при проведении испытаний и моделировании прочих высокотехнологичных процессов [3]. Особенное распространение технология получила в области производства электромобилей, так как они представляют собой целую цифровую систему, включающую сразу ряд новейших технологий. Наиболее популярным примером среди производителей автомобилей, использующих цифровых двойников, является компания Tesla. У каждого автомобиля имеется свой собственный цифровой двойник, который передает в компанию всю информацию о своем физическом близнеце. Таким образом, разработчики, дизайнеры, инженеры и прочие специалисты предприятия могут проводить исследование качества продукции путем постоянного мониторинга, а основываясь на выявленных ошибках, совершенствовать автомобили⁴.

В энергетическом секторе операторы нефтяных месторождений собирают и анализируют огромные объемы информации, полученной при внутрискважинном мониторинге, которые они используют для построения цифровых моделей, управляющих бурением в режиме реального времени [4]. В области здравоохранения исследователи сердечно-сосудистых заболеваний занимаются разработкой высокоточных цифровых двойников человеческого сердца для клинической диагностики, исследований и обучения. Кроме того, в медицинской промышленности данная технология используется при производстве медикаментозных средств, позволяя проводить различные тестирования продукции [7].

Цифровые двойники используются для создания «умных» городов. Выдающимся достижением в области управления умным городом является цифровой двойник Сингапура. Город-государство использует подробную виртуальную модель самого себя в проектах городского планирования, технического обслуживания и обеспечения готовности к стихийным бедствиям [1].

³ Внедрение цифрового двойника: от проекта до запуска // Альфа-Интех: [сайт]. – 2023. – URL: <https://www.alpha-intech.com/blog/uvpravlennie-proizvodstvom/vnedrenie-tsifrovogo-dvojnika/> (дата обращения: 18.05.2023).

⁴ Saracco R. Digital Twins: Evolution in Manufacturing (2022), available at: <https://digitalreality.ieee.org/images/files/pdf/2022may-ebook-digitaltwins-manufacturing2.pdf> (accessed: 18.05.2023).

Такая тенденция набирает обороты благодаря быстрому развитию возможностей симуляции и моделирования, улучшению совместимости с датчиками IoT, а также большей доступности инструментов и вычислительной инфраструктуры. В результате, технология цифровых двойников становится более доступной для крупных и малых предприятий разных отраслей.

В течение последнего десятилетия расширение возможностей цифровых двойников ускорилось благодаря ряду факторов. Первый фактор – это расширение инструментов моделирования. Инструментарий для создания цифровых двойников совершенствуется с каждым годом. На данный момент он позволяет разрабатывать сложные модели «что, если», выходить за рамки реальных условий и не перегружать систему, выполняя при этом большое количество различных процессов. Рост количества поставщиков также способствует росту уровня развития инструментов моделирования.

Кроме того, на расширение возможностей цифровых двойников повлияло появление новых источников данных. Данные технологий мониторинга объектов в режиме реального времени, таких как LIDAR и FLIR, теперь могут быть использованы в моделировании цифровых двойников. Аналогичным образом датчики Интернета вещей, встроенные в оборудование или во всю цепочку поставок, могут передавать операционные данные непосредственно в виртуальные модели, обеспечивая непрерывный мониторинг в режиме реального времени. Так, с помощью Интернета вещей и технологий больших данных цифровые двойники могут собирать данные физических показателей датчиков и делать выводы о некоторых показателях, которые нельзя измерить напрямую [17].

За последнее десятилетие значительно улучшились возможности интеграции цифровых технологий с реальным миром. Значимую роль в этом сыграли усовершенствованные отраслевые стандарты связи между датчиками IoT, аппаратное обеспечение операционных технологий и усилия поставщиков по интеграции с различными платформами.

Немаловажным фактором является повышение уровня визуализации. Огромный объем данных, необходимых для создания моделей цифровых двойников, может усложнить анализ и затруднить получение важной информации. Усовершенствованная визуализация данных может помочь справиться с этой задачей путем фильтрации и обработки ин-

формации в режиме реального времени. Новейшие инструменты визуализации данных выходят далеко за рамки стандартных возможностей представления и включают в себя интерактивные 3D-визуализации, изображения на основе виртуальной и дополненной реальности, визуализации с поддержкой искусственного интеллекта и потоковый протокол реального времени (RTSP).

Совершенствование инструментария играет также значимую роль. Датчики IoT, как встроенные, так и внешние, становятся меньше, точнее, дешевле и мощнее. Благодаря повышению уровня сетевых технологий и безопасности можно использовать традиционные системы управления для получения более детализированной, своевременной и точной информации о реальных условиях для интеграции с виртуальными моделями.

Помимо всего прочего, доступ к мощным и недорогим вычислительным мощностям, сети и хранилищам является ключевым фактором реализации цифровых двойников. Некоторые компании-разработчики программного обеспечения вкладывают значительные средства в облачные платформы, IoT и аналитические возможности, которые позволят им извлечь выгоду из данной тенденции. Часть этих инвестиций помогает оптимизировать разработку сценариев использования цифровых двойников для конкретных отраслей.

Перспективы развития цифровых двойников

Как мы можем заметить, технология цифрового двойника уже начала активно внедряться в высокотехнологичные отрасли производства. По данным информационного отчета Всемирного экономического форума за 2022 год, прогнозируется, что к 2030 году применение технологии цифровых двойников позволит сэкономить 280 миллиардов долларов на городском планировании, строительстве и эксплуатации.

Что касается размера рынка, ожидается, что к 2026 году рынок цифровых двойников достигнет 48,2 млрд долларов США и будет расти со среднегодовым темпом роста 58%⁵.

По мере того, как данная тенденция будет усиливаться в ближайшие годы, все больше организаций смогут изучать возможности использования цифровых двойников для оптимизации процессов, принятия решений на основе данных в режиме реального времени, а также для разработки новых продуктов, услуг и бизнес-моделей. Отрасли с капиталоемкими

⁵ World Economic Forum (2017) *Digital Twin Cities: Framework and Global Practices*, available at: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Digital_Twin_Cities_Framework_and_Practice_2022.pdf (accessed: 17.04.2023).

активами и процессами, такие как производство, коммунальные услуги и энергетика, уже являются пионерами способов использования цифровых двойников. Другие последуют их примеру, заметив очевидное преимущество первопроходцев⁶.

Однако стоит отметить, что существуют некоторые факторы, которые сдерживают развитие цифровых двойников. К таким факторам можно отнести слишком высокую стоимость внедрения технологии, а также недостаточный уровень квалификации кадров и отсутствие четкого нормативного регулирования в этой области. Следовательно, для дальнейшего успешного развития технологии необходимо провести еще множество исследований и доработок, в частности разработать полную детализированную нормативно-правовую базу⁷.

Основные результаты и выводы

По результатам исследования можно отметить, что, несмотря на то, что технология цифровых двойников считается инновационной, ее история начинается еще в 20 веке. В ходе описания хронологии развития концепции было рассмотрено зарождение данного термина, были изучены научные исследования ученых, работавших с идеей создания технологии. Было обнаружено, что предшественниками цифрового двойника являлись также аппаратные двойники, такие как «Железная птица» и «Аполлон». Однако сейчас, в условиях активно развивающихся технологий нового поколения, концепция цифровых двойников становится все более популярной, благодаря эффективности ее применения в промышленности, а также за счет совершенствования факторов, помогающих

ее внедрять. Ввиду перспективности цифровизации можно сделать вывод о том, что в ближайшее время популярность цифровых двойников будет возрастать, так как предприятия будут стремиться внедрить технологию с целью повышения эффективности деятельности и конкурентоспособности. Однако они могут столкнуться с такими проблемами, как дороговизна технологии, отсутствие квалифицированных кадров и нормативных документов, сопровождающих внедрение концепции.

В процессе исследования было выяснено, что использование в производстве цифровых двойников дает предприятиям множество преимуществ. В качестве основного результата работы были выявлены перспективы развития данной технологии. Стоит отметить, что инновационные технологии являются приоритетом для обеспечения эффективности и технологического лидерства предприятий, однако для ускорения развития применения технологии цифровых двойников, нужно устранить некоторые сдерживающие факторы, такие как нехватка у компаний средств и мотивации на реализацию цифровой трансформации или отсутствие сформированной правовой базы.

Научная и практическая значимость полученных результатов заключается в выявлении перспектив развития технологии цифровых двойников. На основании результатов исследования возможно дальнейшее продолжение развития данной теории по направлениям, связанным с более подробным анализом проблем, возникающих при внедрении технологии в различных отраслях промышленности, а также поиском решений для их устранения.

Литература

1. Грищенко Л. Л., Корабельникова Ю. Л. Применение технологий «цифрового двойника» города для обеспечения безопасности его жителей// *Baikal Research Journal*. – 2022. – № 4. – 5 – [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2022.13\(4\).5](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2022.13(4).5). – EDN: DYDEAT.
2. Дозорцев В. М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 1. Возникновение и становление цифровых двойников. Как существующие определения отражают содержание и функции цифровых двойников? // *Автоматизация в промышленности*. – 2020. – № 9. – С. 3–11. – <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.09.01>. – EDN: RVVHRB.
3. Коровин Г. Б. Возможности применения цифровых двойников в промышленности// *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2021. – Т. 27. – № 8. – С. 124–133. – <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-8-124-133>. – EDN: HNFISG.
4. Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли/ В.Н. Быкова [и др.]// *Актуальные проблемы нефти и газа*. – 2020. – № 1 (28). – С. 8, <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8>. EDN: ZHGXAM.

⁶ Parrott A., Umbenhauer B., Warsaw L. (2020) Digital twins. Bridging the physical and digital, *Deloitte Insights*, available at: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/tech-trends/2020/digital-twin-applications-bridging-the-physical-and-digital.html> (accessed: 17.04.2023).

⁷ Вихарев Н. А., Петрушевская А. А. Особенности развития цифровых двойников// *Новые информационные технологии и системы в решении задач инновационного развития: в 2 ч.: сборник статей Международной научно-практической конференции, Казань, 27 мая 2021 г.* – Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2021 – Ч. 1 – С. 18–21. – EDN: JLQNTC.

5. Хитрых Д. Цифровые двойники в промышленности: истоки, концепции, современный уровень развития и примеры внедрения // САПР и графика. – 2022. – № 7. – С. 4–11.
6. Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64. – № 7. – С. 517–531. – <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531>. – EDN: QOKQJW.
7. Цифровой двойник сердца / М. Н. Крамм [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – № 1 (35). – С. 73–84. – <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2021-1-9>. – EDN: VXMIJY.
8. Шведенко В. Н., Мозохин А. Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20. – № 6. – С. 815–827. – <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827>. – EDN: NNHNYS.
9. Främling K., Holmström J., Ala-Risku T., & Kärkkäinen M. (2003). Product agents for handling information about physical objects. *Helsinki University of Technology Laboratory of Information*. No. 153, pp. 20 (In Engl.).
10. Grieves M. (2016). *Origins of the Digital Twin Concept*, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609> (In Engl.).
11. Kuhn T. (2017). Digitaler Zwilling. *Informatik Spektrum*. No. 40, pp. 440–444, <https://doi.org/10.1007/s00287-017-1061-2> (In Engl.).
12. Melesse T. Y., Di Pasquale V., Riemma S. (2021). Digital Twin models in industrial operations: State-of-the-art and future research directions. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*. Vol. 3. No. 1, pp. 37–47, <https://doi.org/10.1049/cim2.12010> (In Engl.).
13. Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. D. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48. No. 3, pp. 567–572, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141> (In Engl.).
14. Shafto M. et al. (2010) DRAFT modeling, simulation, information technology & processing roadmap. Technology area No. 11, NASA, available at: https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf, (accessed: 15.04.2023) (In Engl.).
15. Singh M. et al. (2021). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*. Vol. 4. No 2, pp. 36, <https://doi.org/10.3390/asi4020036> (In Engl.).
16. Stark R., Damerau T. (2019). Digital Twin. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Vol. 66, pp. 1–8, https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1 (In Engl.).
17. Yi D. (2019) Brief Analysis About Digital Twin Supply Chain Model and Application. *Industrial Engineering and Innovation Management*. Vol. 2, Is. 1, pp. 14–23, <http://dx.doi.org/10.23977/ieim.2019.21003> (In Engl.).

References

1. Grishchenko, L. L., Korabel'nikova, Yu. L. (2022) [The use of “digital twin” technologies to ensure the city residents safety]. *Baikal Research Journal* [Baikal Research Journal]. Vol. 4, [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2022.13\(4\).5](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2022.13(4).5). (In Russ.).
2. Dozorcev, V. M. (2020) [Digital twins in industry: genesis, structure, terminology, technologies, platforms, outlook. Part 1 – Origin and evolution of digital twins and how the present-day definitions reflect their matter and functionality]. *Avtomatizaciya v promyshlennosti* [Automation in industry]. Vol. 9, pp. 3–11, <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.09.01>. (In Russ.).
3. Korovin, G. B. (2021) [The opportunities for using digital twins in industry]. *Vestnik ZabGU* [Transbaikal state university journal]. Vol. 27, No. 8, pp. 124–133, <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-8-124-133>. (In Russ.).
4. Bykova, V. N. et al. (2020) [Application of a digital twin in the oil and gas industry]. *Aktual'nye problemy nefti i gaza* [Actual Problems of Oil and Gas]. Vol. 1 (28), pp. 8, <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8>. (In Russ.).
5. Hitryh, D. (2022) [Digital twins in industry: origins, concepts, current level of development and implementation examples]. *SAPR i grafika* [CAD and graphics]. Vol. 7, pp. 4–11. (In Russ.).
6. Carev, M. V., Andreev, Yu. S. (2021) [Digital twins in industry: development history, classification, technologies, use cases]. *Priboroostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. Vol. 64. No. 7, pp. 517–531, <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531>. (In Russ.).
7. Kramm, M. N. et al. (2021) [Digital heart double]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measuring. Monitoring. Management. Control]. Vol. 1 (35), pp. 73–84, <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2021-1-9>. (In Russ.).
8. Shvedenko, V. N., Mozohin, A. E. (2020) [Concept of digital twins at life cycle stages of production systems].

Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. Vol. 20, No. 6, pp. 815–827, <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827>. (In Russ.).

9. Främling, K., Holmström, J., Ala-Risku, T., & Kärkkäinen, M. (2003) Product agents for handling information about physical objects. *Helsinki University of Technology Laboratory of Information*. Vol. 153, pp. 20. (In Eng.).

10. Grieves, M. (2016) Origins of the Digital Twin Concept, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609> (In Eng.).

11. Kuhn, T. (2017). Digitaler Zwilling. *Informatik Spektrum*. No. 40, pp. 440–444, <https://doi.org/10.1007/s00287-017-1061-2> (In Eng.).

12. Melesse, T. Y., Di Pasquale, V., Riemma, S. (2021). Digital Twin models in industrial operations: State-of-the-art and future research directions. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*. Vol. 3. No. 1, pp. 37–47, <https://doi.org/10.1049/cim2.12010> (In Eng.).

13. Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K. D. (2015) About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48. No. 3, pp. 567–572, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141> (In Eng.).

14. Shafto, M. et al. (2010) DRAFT modeling, simulation, information technology & processing roadmap. Technology area. Vol. 11, NASA. Available at: https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf, (accessed: 15.04.2023). (In Eng.).

15. Singh, M. et al. (2021) Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*. Vol. 4. No 2, pp. 36, <https://doi.org/10.3390/asi4020036> (In Eng.).

16. Stark, R., Damerau, T. (2019). Digital Twin. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Vol. 66, pp. 1–8, https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1 (In Eng.).

17. Yi, D. (2019) Brief Analysis About Digital Twin Supply Chain Model and Application. *Industrial Engineering and Innovation Management*. Vol. 2, Is. 1, pp. 14–23, <http://dx.doi.org/10.23977/ieim.2019.21003> (In Eng.).

Информация об авторе:

Дмитрий Алексеевич Сосфенов, ведущий инженер кафедры экономики инноваций, соискатель научной степени кандидата экономических наук по научной специальности 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

ORCID ID: 0009-0006-2144-1317

e-mail: dmitral@yandex.ru

Статья поступила в редакцию: 22.05.2023; принята в печать: 31.07.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Information about the author:

Dmitrii Alekseevich Sosfenov, Leading Engineer of the Department of Economics of Innovations, applicant for the scientific degree of candidate of economic sciences in the scientific specialty 5.2.3. Regional and Sectoral Economics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ORCID ID: 0009-0006-2144-1317

e-mail: dmitral@yandex.ru

The paper was submitted: 22.05.2023

Accepted for publication: 31.07.2023.

The author has read and approved the final manuscript.