

УДК 338

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ И УСТОЙЧИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО: КАК ТЕХНОЛОГИИ INDUSTRY 4.0 СПОСОБСТВУЮТ ДОСТИЖЕНИЮ ЦЕЛЕЙ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЭКОНОМИКИ**А.А. Пермовский, Е.Н. Назарова, Е.А. Аржанова**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина», Нижний Новгород, email: ttpis@yandex.ru, aneutka.nazarowa@yandex.ru, eliza.arzhanova@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается взаимосвязь между внедрением технологий цифровых двойников и переходом промышленных предприятий к моделям циклической экономики. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения ресурсоэффективности российского производства в условиях санкционного давления и дефицита технологического оборудования, а также растущими требованиями к экологической безопасности. Цель работы — выявить механизмы, с помощью которых цифровые двойники способствуют реализации принципов циркулярности на различных этапах жизненного цикла продукции — от проектирования до утилизации. Теоретическая значимость заключается в систематизации подходов к интеграции цифровых технологий в практику ресурсосберегающего производства. Эмпирическую базу составили данные опросов о распространении цифровых двойников среди крупных российских компаний, отраслевые доклады, а также реальные кейсы внедрения предиктивных систем на предприятиях «Норникеля», ГК «Цифра», «ФосАгро», «Ачим Девелопмент» и других, дополненные результатами независимых расчётов эффективности. Показано, что интеграция цифрового моделирования позволяет сокращать объёмы материалоёмких физических прототипов, продлевать срок службы оборудования через предиктивную аналитику и осуществлять виртуальное обращение с возвратными потоками ресурсов. Наиболее ощутимый вклад в циркулярную повестку дают системы контроля экологических параметров и прогнозирования выбросов, цифровое моделирование потоков сырья и готовой продукции, а также виртуальные модели объектов обращения с отходами. Обосновывается вывод о необходимости развития на национальном уровне цифровых платформ, агрегирующих данные о вторичных ресурсах, и более широкого использования предиктивных возможностей цифровых двойников для управления жизненным циклом производственных активов.

Ключевые слова: цифровые двойники, циклическая экономика, Индустрия 4.0, устойчивое производство, предиктивная аналитика, ресурсоэффективность, цифровая трансформация.

DIGITAL TWINS AND SUSTAINABLE MANUFACTURING: HOW INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES SUPPORT THE GOALS OF A CIRCULAR ECONOMY**A.A. Permovsky, E.N. Nazarova, E.A. Arzhanova**

Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, email: ttpis@yandex.ru, aneutka.nazarowa@yandex.ru, eliza.arzhanova@yandex.ru

Abstract. This article examines the relationship between the implementation of digital twin technologies and industrial enterprises' transition to circular economy models. The relevance of the study stems from the need to improve the resource efficiency of Russian production in the face of sanctions and a shortage of technological equipment, as well as growing environmental safety requirements. The aim of the study is to identify the mechanisms by which digital twins facilitate the implementation of circularity principles at various stages of the product lifecycle—from design to disposal. The theoretical significance lies in the systematization of approaches to integrating digital technologies into resource-efficient production practices. The empirical base consists of survey data on the spread of digital twins among large Russian companies, industry reports, and real-life cases of predictive system implementation at Norilsk Nickel, Zyfra Group, PhosAgro, Achim Development, and other enterprises, supplemented by the results of independent efficiency calculations. It is demonstrated that the integration of digital modeling enables the reduction of material-intensive physical prototypes, extends equipment service life through predictive analytics, and enables virtual management of recycled resource flows. The most significant contributions to the circular economy come from environmental monitoring and emission forecasting systems, digital modeling of raw material and finished product flows, and virtual models of waste management facilities. The study substantiates the need for national-level development of digital platforms aggregating data on secondary resources and the wider use of the predictive capabilities of digital twins to manage the lifecycle of production assets.

Keywords: *ESG transformation, digital development, sustainable development, corporate social responsibility, European Union, digital economy, green finance.*

Дата поступления статьи в редакцию: 21.04.2026

Дата принятия статьи в печать: 15.06.2026

Введение

Концепция ESG (Environmental, Social, Governance) в последние годы претерпела значительную эволюцию: из добровольной инициативы, продвигаемой преимущественно крупными международными корпорациями и инвестиционными фондами, она превратилась в один из ключевых драйверов корпоративной стратегии во всем мире. Однако характер этой трансформации существенно различается в зависимости от юрисдикции, исторического контекста и национальных приоритетов. Особый интерес представляет взаимосвязь ESG-трансформации и цифрового развития предприятий, поскольку именно цифровые технологии выступают тем инструментом, который позволяет не только измерять и контролировать ESG-показатели, но и встраивать принципы устойчивости в операционные процессы на качественно новом уровне [10].

Теоретической основой исследования ESG-трансформации служит широкий спектр концепций, начиная от теории стейкхолдеров, согласно которой компания должна учитывать интересы всех заинтересованных сторон, а не только акционеров, и заканчивая ресурсной теорией, которая рассматривает ESG-компетенции как стратегический ресурс, создающий конкурентные преимущества. В российской науке проблематика ESG получила значительное развитие в работах, посвященных корпоративной социальной ответственности, устойчивому развитию и «зеленой» экономике. Однако, как отмечают исследователи, в условиях санкционного давления и деглобализации происходит трансформация подходов к принципам КСО и ESG в российском контексте, что требует переосмысления теоретических моделей, разработанных в более благоприятных внешнеэкономических условиях. В 2025 году ESG повестка перестала быть маркетинговым инструментом и переживает этап «прагматичной трансформации», а в Европе она превратилась в жесткий фискальный и регуляторный каркас, а в России — в прагматичный стандарт операционной эффективности [4].

Особого внимания заслуживает вопрос о том, как цифровая трансформация и ESG-трансформация соотносятся друг с другом. В работе, выполненной на базе Высшей школы экономики, утверждается, что цифровая трансформация выступает основой для ESG-трансформации компаний [10]. Эта взаимосвязь не является односторонней: цифровые технологии позволяют автоматизировать сбор и анализ ESG-данных, что снижает транзакционные издержки и повышает прозрачность, а высокие ESG-стандарты, в свою очередь, стимулируют внедрение более эффективных и экологичных цифровых решений.

В европейской практике регулирование ESG достигло наибольшей степени институционализации. Европейский Союз в рамках реализации «Европейского зеленого курса» предпринимал усилия по ужесточению требований в области ESG, постепенно переходя от общих декларативных заявлений к закреплению конкретных юридических обязательств для бизнеса [8]. Ключевыми документами здесь выступают Директива о корпоративной отчетности в области устойчивого развития (CSRD) и Директива о надлежащей комплексной проверке в области устойчивого развития (CSDDD). В 2025 году Европейский парламент принял пакет поправок Omnibus I, направленных на упрощение требований CSRD и CSDDD, однако эти послабления не отменяют саму логику перехода к обязательному и стандартизированному раскрытию ESG-информации.

Российская практика в этом контексте демонстрирует иную траекторию. Как справедливо отмечается в исследовании, опубликованном в журнале «Акционерное общество: вопросы корпоративного управления» в 2025 году, повестка ESG перестала быть маркетинговым инструментом и переживала этап «прагматичной трансформации», в Европе она превратилась в жесткий фискальный и регуляторный каркас, а в России — в прагматичный стандарт операционной эффективности [4]. Это различие имеет глубокие институциональные корни и определяет разные стратегии цифрового развития предприятий: если европейские компании вынуждены инвестировать в системы сбора и анализа ESG-данных под давлением регулятора, то российские предприятия все чаще делают это исходя из соображений экономической эффективности, снижения издержек и повышения инвестиционной привлекательности [5]. Актуальность настоящего

исследования обусловлена необходимостью теоретического осмысления этих различий и оценки того, как российская модель ESG-трансформации соотносится с европейской в условиях цифровизации экономики.

Цель исследования

Целью исследования является выявление конкретных механизмов, с помощью которых внедрение цифровых двойников на российских промышленных предприятиях способствует достижению целей циклической экономики, а также оценка масштабов распространения этих технологий в отечественной промышленности [3, 11]. Для достижения поставленной цели последовательно решаются задачи анализа текущего уровня внедрения цифровых двойников в России, рассмотрения наиболее показательных отраслевых кейсов и обобщения накопленного опыта в виде практических рекомендаций, адресованных как субъектам хозяйственной деятельности, так и регуляторам [1, 12].

Материал и методы исследования

Эмпирическую базу исследования составили данные из нескольких групп источников. Первая группа включает официальные документы и данные государственных органов и корпоративных структур: информацию о создании отраслевых цифровых двойников, отчётные материалы о цифровизации объектов инфраструктуры, статистику индустриальных центров компетенций [6, 10]. Вторая группа источников представлена научными публикациями российских авторов за 2024–2026 годы, посвящёнными как теоретическим аспектам цифровых двойников и циркулярной экономики, так и эмпирическим исследованиям конкретных кейсов внедрения. Третью группу составляют отраслевые аналитические обзоры и публикации, содержащие детальные описания проектов по созданию цифровых двойников на российских предприятиях.

Методология исследования базируется на сочетании качественного и количественного подходов. Качественный анализ применялся для изучения конкретных кейсов внедрения цифровых двойников, выявления механизмов их влияния на ресурсоэффективность и классификации типов таких механизмов. Количественная оценка использовалась для анализа масштабов распространения цифровых двойников в российской промышленности на основе опросных данных, а также для оценки экономической эффективности внедрения. Сравнительный метод позволил сопоставить российскую практику применения цифровых двойников с зарубежными аналогами, выявить характерные особенности и специфические барьеры.

Особое внимание было уделено отбору кейсов для детального анализа. Критериями отбора служили: наличие количественных данных об эффектах от внедрения; принадлежность к отрасли, характеризующейся высокой материалоёмкостью и значительным объёмом отходов; возможность проследить связь между цифровой трансформацией и конкретными показателями ресурсосбережения. В результате были отобраны кейсы угольного разреза, газоконденсатного актива, химического кластера, а также системы контроля выбросов на металлургическом предприятии. Кроме того, были проанализированы данные о цифровых двойниках объектов обращения с отходами.

Результаты исследования

Для понимания масштаба анализируемого явления необходимо, прежде всего, оценить, насколько широко технология цифровых двойников уже внедрена в российских производственных компаниях и какова динамика этого процесса. Согласно данным опросов и аналитическим обзорам, цифровые двойники в 2024 году использовались 22% крупных российских компаний, а ещё 34% находились в стадии планирования внедрения. Это означает, что более половины крупного бизнеса либо уже сделал ставку на цифровое моделирование, либо находится в активной фазе подготовки к такому шагу. При этом основным стимулом выступает не абстрактное стремление к цифровизации, а острая потребность в импортозамещении и повышении надёжности оборудования в условиях, когда поставки западных комплектующих и программного обеспечения оказались затруднены или полностью прекращены [6].

В отраслевом разрезе картина выглядит следующим образом. В нефтегазовом секторе, как прозвучало на ЦИПР-2025, уже реализовано 16 проектов индустриальных центров компетенций, создаются цифровые двойники – виртуальные модели производственных объектов и технологических процессов, а отечественным ПО покрыто 84% ИТ-ландшафта отрасли с планом достиже-

ния 100% к 2027 году [6]. В металлургии около 35% используемых решений уже выполняются с применением отечественного ПО, а к январю 2026 года ожидается завершение 90% разработок промышленных центров компетенций, которые должны покрыть более 60% ИТ-решений отрасли. В химической и фармацевтической отраслях российские ИТ-решения активно применяются – в частности, в период пандемии отечественное ПО использовалось при производстве вакцин, а также в молекулярном моделировании при разработке оригинальных молекул [10].

Несмотря на очевидный прогресс, остаётся и значительный резерв для роста. Для сравнения: по оценкам международных аналитических агентств, доля зарубежных компаний, уже использующих цифровые двойники, существенно выше. Тем не менее, темпы внедрения в России после 2022 года заметно ускорились – прежде всего за счёт вынужденного замещения ушедших западных систем управления производством [5]. При этом, как показывает анализ, российские предприятия часто идут не по пути простой замены импортного ПО на отечественные аналоги, а используют момент для комплексной перестройки своих цифровых систем, внедряя полноценные цифровые двойники, а не просто отдельные модули учёта и контроля [1].

Одним из наиболее показательных примеров того, как цифровое моделирование способствует рациональному использованию ресурсов и сокращению отходов, является реализованный проект цифрового двойника на угольном разрезе. Это первый в России масштабный проект полной цифровой трансформации горнодобывающего комплекса, выполненный на полностью отечественном программном обеспечении [1]. Цифровой двойник представляет собой единую систему, которая отслеживает весь производственный цикл от забоя до фабрики: она строит материальный баланс, связывает поступление сырья с результатами обогащения, оперативно планирует работы и управляет транспортными потоками в режиме реального времени. Ранее разрез использовал устаревшую систему, работавшую более 11 лет, которая фиксировала лишь рейсы, время событий и отчёты по технике, то есть представляла собой не более чем «счётчик событий». Новая же система собирает телеметрию с каждой единицы техники, анализирует состояние оборудования, учитывает геометрию карьера и строит динамическую модель производства.

С точки зрения циркулярной экономики этот кейс важен по нескольким причинам. Во-первых, сквозной материальный баланс, реализованный в цифровом двойнике, позволяет точно оценить, сколько сырья извлечено, сколько потерь произошло на каждом переделе и где именно эти потери возникают. Это, в свою очередь, даёт возможность целенаправленно сокращать неэффективные участки, снижая тем самым объёмы отходов на стадии добычи и обогащения. Во-вторых, система автоматического распределения самосвалов, которая сама определяет оптимальные маршруты и загрузку, минимизируя простои, позволяет сократить холостые пробеги и, следовательно, уменьшить расход топлива и износ техники – а значит, продлить ресурс подвижного состава и снизить объём образующихся при его списании отходов. В-третьих, внедрение проекта по роботизации бурового станка, обеспечившее прирост производительности на 21% за счёт непрерывной работы без усталости и повышения точности сверления, демонстрирует, как автоматизация на основе цифровой модели одновременно повышает и экономическую, и экологическую эффективность.

Интересно, что подобные подходы к управлению материальными потоками с помощью цифровых двойников начинают масштабироваться и на другие отрасли. Так, в Хабаровском крае региональный центр инжиниринга освоил технологию создания цифровых двойников объектов и процессов, которую уже внедрили на заводе. Как отмечают специалисты центра, применение такой технологии позволяет сократить время и минимизировать риски при оптимизации производств в несколько раз. В качестве другого примера приводится проект для предприятия из группы компаний, в рамках которого был создан цифровой двойник с целью оптимизации складской логистики. Моделирование показало, что внедрение разработанной адресной системы хранения позволит увеличить плотность размещения товаров в два раза, а процессы приёма и выдачи ускорить в три раза. Сокращение складских площадей и оптимизация перемещений грузов – это прямое снижение затрат материальных ресурсов на строительство и эксплуатацию складских помещений [5].

Вторая, не менее значимая группа механизмов, связывающих цифровые двойники с циркулярной экономикой, относится к эксплуатационной стадии жизненного цикла оборудования. В классической модели планово-предупредительного ремонта большинство агрегатов заменяется

или капитально ремонтируется по истечении заранее установленного срока, независимо от их реального состояния. Такой подход неизбежно ведёт к тому, что часть оборудования, ещё вполне пригодного к эксплуатации, преждевременно выводится из строя, а его компоненты отправляются в отходы. Переход к обслуживанию по фактическому состоянию, реализуемый на основе анализа данных с датчиков и прогнозных моделей, позволяет снизить количество избыточных замен и, следовательно, уменьшить объём образующихся отходов [3, 12].

Как отмечается в публикациях, посвящённых применению предиктивной аналитики в промышленности, технологии позволяют сократить простой оборудования, по разным оценкам, от 25 до 50 процентов и снизить затраты на ремонт до 30 процентов. «Цифровые двойники и системы предиктивной аналитики создают принципиально новый уровень контроля над оборудованием». По данным консалтинговых компаний, доля предприятий, которые внедряют и используют предиктивную аналитику для выявления возможных неисправностей оборудования, пока не превышает 5 процентов, а многие проекты находятся в стадии «пилотов». Как комментируют эксперты, это во многом связано с отсутствием стандартизированного систематического сбора данных на предприятиях и нехваткой квалифицированного персонала. Что касается игроков, которые так или иначе используют эту технологию, то в основном это крупные госкомпании. Тем не менее, после внедрения ML-решений компании выходят на окупаемость за 2–6 месяцев, а дальше чистая экономия за счёт снижения затрат на ремонт может достигать 30 процентов [1].

В нефтехимической отрасли, как следует из работы коллектива авторов, опубликованной в 2025 году, интеграция цифровых двойников и предиктивной аналитики рассматривается как перспективный инструмент снижения вероятности аварий и оптимизации затрат на обслуживание [3]. Цифровой двойник, согласно ГОСТ Р 57700.37-2021, обеспечивает целостное представление о состоянии оборудования, а предиктивная аналитика делает возможным раннее выявление аномалий. Модель позволяет «заглянуть» внутрь оборудования, увидеть износ деталей, появление коррозии или неравномерный нагрев стенок, не разбирая агрегат. Через интерфейс оператор может проиграть сценарии «что будет, если» – частичное засорение фильтра, скачок давления или отключение питания – и программа мгновенно рассчитывает последствия, показывает риск повреждения и предлагает оптимальное действие. Кроме мониторинга, цифровой двойник служит учебной площадкой: новые сотрудники отрабатывают ручные операции в виртуальном цехе, что сокращает риск аварий из-за ошибок персонала и, как следствие, уменьшает внеплановые выбросы и поломки оборудования [7, 9].

Особого внимания заслуживает кейс компании, которая в условиях санкционного давления и дефицита комплектующих сделала ставку на реверсивный инжиниринг и аддитивные технологии в сочетании с цифровым моделированием. Как было представлено на крупном экономическом форуме в 2025 году, это позволяет производить детали без оригинальных чертежей и документации, что особенно важно для горнодобывающей отрасли, где оперативная замена изношенных компонентов критически важна. Ярким примером стало изготовление детали весом в 500 кг, имеющей сложную спиралевидную форму и применяемой в насосной установке. Ранее её замена занимала около года из-за необходимости заказывать её у сторонних производителей и ждать поставки. Благодаря 3D-сканированию, цифровому моделированию и аддитивному производству предприятие смогло изготовить её в кратчайшие сроки, существенно сократив время простоя оборудования [5,10].

С позиций циклической экономики этот пример имеет принципиальное значение. Возможность оперативно восстанавливать или заново изготавливать изношенные детали средствами цифрового моделирования и аддитивных технологий означает, что оборудование может эксплуатироваться значительно дольше, нежели в ситуации, когда замена детали требует длительного ожидания поставки [3]. Продление срока службы агрегатов – это снижение объёмов металлолома и других отходов, образующихся при преждевременном списании техники. Кроме того, аддитивное производство само по себе является более ресурсоэффективным по сравнению с традиционными методами обработки (вытачивание из цельной заготовки), поскольку материал добавляется послойно именно там, где он нужен, а не удаляется лишний с образованием стружки и обрезков [1].

Экологическая составляющая циркулярной экономики включает не только собственно сокращение отходов, но и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду на

всех этапах производства. В этой области цифровые двойники также демонстрируют высокую эффективность. В рамках индустриального центра компетенций «Экология» была представлена система контроля выбросов, которая представляет собой цифровой двойник технологической цепочки предприятия. Система способна на основе климатических и метеорологических данных, а также информации о технологических процессах прогнозировать загрязнение воздуха и предупредить его. Эта система стала первой в России, сертифицированной как средство измерения с использованием искусственного интеллекта. Она позволяет в режиме предиктивного анализа оценивать вредные выбросы и оперативно корректировать технологический процесс на объектах. Разработка может быть применена не только в металлургии, но и в нефтегазовой, энергетической и нефтехимической отраслях [10].

Создание подобных систем даёт возможность не фиксировать превышения постфактум, что всегда чревато административной и финансовой ответственностью, а предотвращать их, оптимизируя технологические процессы в реальном времени [2]. Для циркулярной экономики это означает, что внешние экологические издержки, которые традиционно рассматривались как побочный эффект, подлежащий компенсации после нарушения, становятся управляемым параметром, интегрированным в операционный контур предприятия.

На ещё более высоком – отраслевом – уровне цифровые двойники начинают применяться для контроля выбросов парниковых газов и соблюдения климатических обязательств. В ноябре 2025 года Министерство энергетики России поставило задачу создать «цифровых двойников» для всей цепочки нефтепереработки и нефтехимии, включая подсекторы добычи [6]. Реализация этой задачи, если она будет выполнена, позволит унифицировать учёт эмиссий, сделать систему управления экологическими рисками более прозрачной и, что важно для циркулярной экономики, связать воедино данные о выбросах на разных этапах технологической цепочки, выявляя возможности для их сокращения.

Отдельное, весьма масштабное направление применения цифровых двойников в российской практике связано не с промышленным производством как таковым, а с системой обращения с отходами. За 2022–2024 годы было построено 977 цифровых моделей объектов размещения отходов (при общем количестве полигонов 997) [11]. Цифровые двойники полигонов, созданные с помощью беспилотных летательных аппаратов, оснащённых лидарами, тепловизорами и газоанализаторами, позволяют оценить текущее состояние полигонов, определить оставшийся срок их эксплуатации, выявить нарушения – выход за границы отведённого участка, отсутствие ограждения, распространение фильтрата, возгорания и тление. Фиксируются ключевые параметры объектов: площадь, объём, высота, а также участки, выходящие за пределы отведённой территории, случаи обрушения откосов и распространения фильтрата за границы объекта. Все данные загружаются в информационную систему, оснащённую собственной нейронной сетью для анализа данных [1].

С точки зрения циркулярной экономики эти цифровые двойники выполняют сразу несколько функций. Во-первых, они позволяют прогнозировать дефицит мощностей по размещению отходов и, следовательно, планировать строительство новых объектов переработки, а не просто новых полигонов. Во-вторых, они служат инструментом экспертизы концепций развития отрасли обращения с отходами, которые заложены в территориальных схемах: имея точные данные о фактическом состоянии полигонов, можно оценить, насколько реалистичны планы по вовлечению отходов во вторичный оборот. В-третьих, мониторинг возгораний и выделений газов позволяет предотвращать техногенные аварии, связанные с полигонами, а значит, снижать дополнительный ущерб окружающей среде [5].

На уровне региона также создаются цифровые модели более мелких объектов. Например, в Приморском крае создан цифровой двойник контейнерных площадок в муниципалитетах – описано 18 945 площадок в 34 муниципальных районах и городских округах. Это позволяет, в частности, оптимизировать маршруты мусоровозов, отслеживать наполняемость контейнеров и более рационально распределять транспортные ресурсы.

Несмотря на впечатляющие успехи и масштабные планы, нельзя не отметить, что интеграция цифровых двойников в практику устойчивого производства сталкивается с рядом серьёзных препятствий, без преодоления которых рассчитывать на широкое и системное применение технологий было бы преждевременно [3, 6].

Первая группа барьеров связана с данными. Как подчёркивается в аналитических материалах, доля компаний, внедряющих предиктивную аналитику, не превышает 5 процентов, и одной из главных причин называется отсутствие стандартизированного систематического сбора данных на предприятиях. Для построения полноценного цифрового двойника, особенно в режиме реального времени, необходимы датчики на оборудовании, системы передачи данных и накопители достаточной ёмкости. На многих российских предприятиях, особенно не входящих в крупные государственные корпорации, такая инфраструктура либо отсутствует, либо находится в зачаточном состоянии [1,11].

Вторая группа барьеров – кадровая. Для работы с цифровыми двойниками и предиктивными моделями требуются специалисты, обладающие компетенциями одновременно в области промышленного производства, информационных технологий и анализа данных [7, 9]. Дефицит таких специалистов ощущается во всех отраслях, и это ограничивает скорость и качество внедрения.

Третья группа барьеров относится к регуляторной среде. Хотя создание отраслевых цифровых двойников объявлено на уровне министерств, конкретные нормативные требования к их созданию и использованию, включая стандарты обмена данными, форматы отчётности и требования к верификации, остаются во многом несформированными [6]. Отсутствие общих правил затрудняет масштабирование успешных пилотных проектов на всю отрасль и интеграцию разрозненных цифровых моделей в единую систему.

Четвёртая группа барьеров носит экономический характер. Цифровые двойники требуют значительных первоначальных инвестиций в оборудование, программное обеспечение и обучение персонала. В условиях высокой ключевой ставки и ограниченного доступа к кредитным ресурсам для многих предприятий, особенно средних, такие инвестиции становятся недоступными.

Какие меры могли бы способствовать более активному и эффективному использованию цифровых двойников в интересах циркулярной экономики?

Во-первых, необходимо создание на национальном уровне стандартизированных форматов обмена данными между промышленными датчиками, системами мониторинга и аналитическими платформами. Опыт создания информационной системы мониторинга объектов размещения отходов с собственной нейронной сетью для анализа данных мог бы быть распространён и на другие отрасли. Унификация форматов позволит сравнивать данные с разных предприятий, выявлять лучшие практики и переносить их с одного завода на другой.

Во-вторых, перспективным представляется развитие института индустриальных центров компетенций (ИЦК), который уже доказал свою эффективность в нефтегазовой, металлургической, химической и авиационной отраслях [6]. В рамках ИЦК можно было бы создать специализированные рабочие группы по цифровым двойникам для циркулярной экономики, которые занимались бы разработкой типовых решений, оценкой их эффективности и трансфером технологий между предприятиями.

В-третьих, обращение к зарубежному опыту, несмотря на санкционные ограничения, остаётся полезным. В странах Европейского Союза, как следует из обзоров, такие компании, как Renault и BASF, уже разрабатывают стратегии по повторному использованию ресурсов в производственной цепочке с активным применением цифровых технологий. В Китае цифровые двойники используются для оптимизации материальных потоков в масштабах целых промышленных кластеров. Адаптация этих подходов к российским условиям могла бы ускорить прогресс.

В-четвёртых, целесообразно рассмотреть вопрос о государственной поддержке проектов по созданию цифровых двойников, направленных на ресурсосбережение и сокращение отходов. Это могут быть налоговые льготы, субсидирование процентной ставки по кредитам на закупку датчиков и ПО, а также гранты на обучение персонала. Опыт включения проекта по цифровизации полигонов отходов в федеральный проект показывает, что такая поддержка возможна и приносит результаты [4, 5, 11].

В-пятых, на уровне предприятий необходимо внедрение систем непрерывного обучения и повышения квалификации персонала в области цифровых технологий и предиктивной аналитики. Цифровой двойник, как уже упоминалось, может служить не только инструментом мониторинга и прогнозирования, но и учебной площадкой, где новые сотрудники могут безопасно осваивать сложные технологические процессы [3, 7, 9].

Заключение

Проведённый анализ позволяет сформулировать ряд выводов, имеющих как теоретическое, так и практическое значение.

Во-первых, исследование подтверждает, что в российской промышленности сложились предпосылки для активного использования цифровых двойников в интересах циркулярной экономики. 22% крупных компаний уже применяют эту технологию, а 34% находятся в стадии планирования, что создаёт критическую массу для распространения лучших практик. При этом основным драйвером внедрения выступает не абстрактная приверженность принципам устойчивого развития, а прагматическая необходимость импортозамещения и повышения надёжности оборудования в условиях санкционного давления. Однако этот прагматический контекст не снижает ценности достигаемых экологических эффектов, а напротив, делает их более устойчивыми и воспроизводимыми, поскольку они завязаны на реальные экономические стимулы.

Во-вторых, конкретные механизмы вклада цифровых двойников в циклическую экономику могут быть сгруппированы вокруг трёх основных направлений. Первое направление – это сокращение отходов на стадии производства за счёт сквозного учёта материальных потоков и оптимизации технологических режимов (на примере цифрового двойника разреза, обеспечившего рост производительности на 21% и минимизацию холостых пробегов транспорта). Второе направление – продление срока службы оборудования через переход от планово-предупредительного ремонта к обслуживанию по фактическому состоянию на основе предиктивной аналитики (сокращение простоев на 25–50%, снижение затрат на ремонт до 30%). Третье направление – экологический мониторинг и предотвращение сверхнормативных выбросов (система, позволяющая в режиме предиктивного анализа корректировать технологический процесс до наступления нарушения). Кроме того, важную, хотя и менее очевидную роль играют цифровые двойники в сфере обращения с отходами, которые уже созданы для 977 полигонов и позволяют оценивать их остаточную вместимость, выявлять нарушения и планировать развитие отрасли.

В-третьих, несмотря на достигнутые успехи, остаются существенные барьеры, сдерживающие более широкое применение цифровых двойников для целей циркулярной экономики. Главные из них – недостаточная стандартизация сбора данных, дефицит квалифицированных кадров, неполнота регуляторной базы и высокие первоначальные инвестиции. Преодоление этих барьеров требует комплекса мер: от создания единых отраслевых стандартов обмена данными и развития института индустриальных центров компетенций до финансовой поддержки приоритетных проектов со стороны государства и внедрения систем непрерывного обучения персонала.

В-четвёртых, обращение к зарубежному опыту, в частности к практикам европейских и азиатских компаний, показывает, что наиболее высокие результаты в интеграции цифровых двойников и циркулярной экономики достигаются там, где технологические решения подкреплены системными изменениями в управлении, включая создание межотраслевых цифровых платформ и внедрение механизмов экономической ответственности за экологические последствия.

Представленный в статье анализ позволяет утверждать, что цифровые двойники, будучи одной из ключевых технологий Индустрии 4.0, уже сегодня вносят практический вклад в переход российской промышленности к более рациональному использованию ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. При этом важно подчеркнуть, что этот вклад реализуется не через прямое внедрение абстрактных «циркулярных стандартов», а через решение вполне конкретных операционных задач – от своевременной замены изношенного компонента до точного прогноза выбросов. Иными словами, циркулярность в данном случае выступает не как самоцель, а как естественное следствие цифровой трансформации управления активами и материальными потоками.

Вместе с тем потенциал цифровых двойников для замыкания цепочек поставок и организации повторного использования ресурсов используется пока далеко не полностью. Наибольшее распространение получили решения, лежащие в плоскости мониторинга и контроля; гораздо реже цифровые модели применяются для активного проектирования потоков вторичного сырья и интеграции перерабатывающих мощностей в единую цифровую экосистему. Дальнейшие исследования в этой области могли бы быть направлены на изучение зарубежного опыта создания отраслевых цифровых платформ для вторичных ресурсов, разработку методик оценки эффективности цифровых двойников именно с точки зрения циркулярности, а также на выявление наиболее перспективных отраслей для масштабирования успешных практик.

Литература

1. Воропаев П.В. Цифровые двойники как инструмент повышения экономической эффективности на предприятиях РФ // Инновации и инвестиции. 2025. № 3. С. 168-170. EDN: WFKMKW.
2. Воскобойникова М.Ю., Мустафаев З.И., Антонова Е.А. Устойчивое развитие предприятий в эпоху Индустрии 4.0: синергия экологии, экономики и цифровых технологий // Экономика, управление, право: проблемы и пути развития. 2026. Т. 9, № 2. С. 22-31. DOI: 10.36871/ek.ur.p.g.2026.02.09.022 EDN: JWLFDX.
3. Ионов А.Г., Юдин А.В. Цифровой двойник для повышения адаптивности и устойчивости производства // Стандарты и качество. 2024. № 5. С. 66-71. DOI: 10.35400/0038-9692-2024-5-134-23 EDN: KIZDXW.
4. Назарова Е.Н., Назарова А.Н. Инновационный потенциал цифровой экономики: гиперавтоматизация как инновация в бизнесе // Инновационный потенциал цифровой экономики: состояние и направления развития: сборник научных статей 2-й Международной научно-практической конференции, Курск, 20-21 октября 2022 года. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 192-195. EDN: IAGBFL.
5. Орлов Д.К. Цифровые двойники сложных технических систем: от концепции до внедрения. М.: Инфра-Инженерия, 2024. 204 с.
6. Приймук И.Г., Чернышева Т.Е. К технологическому суверенитету России: «догнать и перегнать» Индустрию 4.0 // Научноёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Региональной научно-технической конференции (Калуга, 23-25 апреля 2024 г.): в 2 т. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2025. Т. 2. С. 354-358. EDN: TOEGZA.
7. Романовская Е.В., Панков А.В., Назарова Е.Н. Цифровые двойники и симуляторы для обучения управлению ESG-рисками: анализ опыта разработки и внедрения в учебный процесс // Проблемы современного педагогического образования. 2025. № 89-3. С. 331-334. EDN: RFTR00.
8. Фонтана К.А., Ерзнкян Б.А. Вопросы интеграции технологий Индустрии 4.0, возможностей экономики замкнутого цикла и устойчивых цепочек поставок в контексте корпоративной устойчивости // Стратегическое планирование и развитие предприятий: материалы XXVI Всероссийского симпозиума (Москва, 15-16 апреля 2025 г.) / под ред. чл.-корр. РАН Г. Б. Клейнера. М.: ЦЭМИ РАН, 2025. С. 115-122. DOI: 10.34706/978-5-8211-0833-3-S2-47 EDN: SHURII.
9. Халадов Х.А.С., Бугайчук Т.В., Медведева Т.Ю., Вотинцев А.В. Ценностно-мотивационная сфера студентов - будущих педагогов и воспитательная среда вуза // Вестник Мининского университета. 2025. Т. 13, № 4 (53). DOI: 10.26795/2307-1281-2025-13-4-1 EDN: MKCZCW.
10. Цифровая трансформация промышленных предприятий: экономический аспект / под ред. В. А. Дуболазовой. Новосибирск: Изд-во НГПУ, 2025. 188 с.
11. Абрамов В.И., Балаян Д.В. Цифровые двойники в промышленности: проблемы и перспективы // Приоритетные векторы развития промышленности и сельского хозяйства: материалы IV Международной научно-практической конференции: в 7 т.. Том III. Макеевка, 2021. С. 16-20. EDN: ZIRSRG.
12. Яковлева М.И., Ануфриева В.Д., Веселов С.О., Шингарев А.Ф. Интеграция бережливого производства и технологий индустрии 4.0 // СТАРТ в НАУКЕ - 2025: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. Петрозаводск: Международный центр научного партнёрства «Новая Наука», 2025. С. 15-21. EDN: RHFYQO.