Стратегическое управление внедрением промышленных цифровых двойников на предприятиях нефтегазовой, нефтеперерабатывающей и химической промышленности

Яна Мишина

Аннотация

Промышленные цифровые двойники становятся значимым инструментом цифровой трансформации капиталоемких производственных систем. Их потенциальная ценность связана с возможностью объединения фактических данных, инженерных моделей, мониторинга, прогнозирования, сценарного анализа и оптимизации в едином контуре поддержки управленческих решений. Вместе с тем техническая состоятельность цифровой модели сама по себе не гарантирует возникновения устойчивого производственного или экономического эффекта. Цель настоящего исследования состоит в разработке стратегического подхода к внедрению промышленного цифрового двойника, связывающего технологическую архитектуру с бизнес-задачей, системой принятия решений, организационной ответственностью и подтверждением создаваемой ценности. Методологическую основу составляют системный анализ, структурная декомпозиция жизненного цикла цифрового двойника и концептуальный синтез управленческих условий его внедрения. Особое внимание уделяется предприятиям нефтегазовой, нефтеперерабатывающей и химической промышленности, характеризующимся высокой капиталоемкостью, технологической взаимосвязанностью процессов, продолжительным жизненным циклом активов и высокой стоимостью ошибочных решений. Предлагается рассматривать зрелость промышленного цифрового двойника через уровень его включенности в фактический управленческий цикл: от наблюдения и диагностики до прогнозирования, сценарного анализа, оптимизации и поддержки решений. Разработана модель жизненного цикла внедрения, охватывающая постановку бизнес-задачи, определение сценария применения, формирование ожидаемой ценности, создание системы управления, подготовку данных и технологий, пилотирование, организационную интеграцию, эксплуатацию, оценку результата и масштабирование. Показано, что устойчивое внедрение требует согласованного развития технологического, информационного и

организационного компонентов, а при масштабировании воспроизводится не только программное решение, но и связанная с ним система данных, моделей, процессов, ответственности и управленческих практик.

Ключевые слова: промышленный цифровой двойник, нефтегазовая промышленность, нефтеперерабатывающая промышленность, химическая промышленность, цифровая трансформация, управление производственными активами, поддержка принятия решений, жизненный цикл цифрового двойника, промышленная аналитика, масштабирование цифровых решений.

1. Введение

Промышленные цифровые двойники занимают особое место среди современных цифровых технологий, поскольку соединяют цифровое представление физического объекта с потоками фактических данных, инженерными моделями и аналитическими средствами. В развитом состоянии цифровой двойник способен не только отображать характеристики производственной системы, но и использовать информацию о ее текущем состоянии для диагностики отклонений, прогнозирования, моделирования альтернативных сценариев и подготовки управленческих решений [1–8].

Особое значение такая технология приобретает в нефтегазовой, нефтеперерабатывающей и химической промышленности. Производственные системы в этих отраслях характеризуются высокой стоимостью физической инфраструктуры, длительным жизненным циклом активов и значительной взаимозависимостью технологических процессов. Изменение режима отдельного элемента способно повлиять на последующие стадии производства, надежность оборудования, использование ресурсов, безопасность и экономический результат [13–19, 26].

В таких условиях последствия управленческого решения могут сохраняться значительно дольше, чем жизненный цикл отдельного программного продукта. Ошибка, связанная с выбором режима эксплуатации производственного актива, инвестиционным решением либо изменением технологической конфигурации, способна привести не только к краткосрочному снижению эффективности, но и к дополнительным затратам, ограничениям надежности и необходимости вмешательства в физическую инфраструктуру [14–17, 21, 26].

Поэтому промышленный цифровой двойник необходимо рассматривать не только как инженерную или информационную технологию. Его практическая ценность возникает в той мере, в какой цифровая модель становится частью реальной системы принятия решений. Мониторинг, прогнозирование, сценарное моделирование и оптимизация обладают ограниченной организационной ценностью, если полученные результаты не связаны с процессами эксплуатации, планирования и управления активом [7, 14, 17, 20, 21].

Именно здесь возникает основная проблема внедрения. Организация способна успешно разработать цифровую модель, обеспечить получение данных и подтвердить техническую корректность расчетов, но при этом не получить ожидаемого производственного или экономического результата. Причины такого разрыва могут находиться за пределами самой технологии: в недостаточно определенной задаче, низкой готовности данных, отсутствии ответственности за конечный результат, несогласованности инженерных и производственных функций, ограниченном доверии пользователей либо неспособности перевести пилотное решение в устойчивую эксплуатацию [13, 14, 16–20].

Следовательно, жизненный цикл промышленного цифрового двойника должен начинаться раньше непосредственной разработки цифровой модели. До выбора архитектуры необходимо определить проблему, которую предполагается решить, управленческое или производственное решение, которое должно измениться, предполагаемых пользователей и критерии, позволяющие подтвердить создаваемую ценность [9, 12, 13, 25].

Аналогично жизненный цикл не завершается техническим вводом системы в эксплуатацию. После запуска необходимо подтвердить фактическое использование, определить влияние на процессы и результат, сформировать устойчивую эксплуатационную ответственность и лишь после этого принимать решение о дальнейшем функциональном либо объектном масштабировании [21, 25, 26].

Существующая научная литература предлагает развитые подходы к определению и архитектуре цифровых двойников, оценке их технологической зрелости и стандартизации основных компонентов [1, 4, 6, 10, 11, 22, 24]. Отдельное направление исследований посвящено условиям и барьерам внедрения цифровых двойников в

процессных отраслях, нефтегазовой и химической промышленности [13–19]. Вместе с тем сохраняется необходимость отраслевой интеграции этих подходов в управленческую модель, связывающую уровень практического использования цифрового двойника, жизненный цикл его внедрения, распределение ответственности и условия последующего масштабирования в капиталоемких производственных системах [21, 25].

Цель настоящего исследования состоит в разработке стратегического подхода к управлению внедрением промышленных цифровых двойников, обеспечивающего последовательную связь между бизнес-задачей, технологической реализацией, информационной основой, организационным внедрением и фактическим результатом.

В рамках исследования решаются четыре взаимосвязанные задачи: определяется место промышленного цифрового двойника в системе поддержки решений; структурируется управленческий жизненный цикл его внедрения; выявляются основные механизмы потери ожидаемой ценности; устанавливаются условия перехода от локального решения для отдельного производственного объекта к воспроизводимой системе цифрового управления.

Научный вклад настоящего исследования состоит в отраслевой конкретизации и интеграции управленческих условий внедрения промышленного цифрового двойника. Предлагаемый подход связывает уровень использования цифрового двойника в процессе принятия решений с требованиями к данным и инженерным моделям, распределением организационной ответственности и стадиями жизненного цикла, а масштабирование рассматривает как воспроизведение совокупности технологических и управленческих условий при сохранении необходимости объектной адаптации.

2. Промышленный цифровой двойник как система поддержки управленческих решений

Понятие цифрового двойника часто связывается с созданием цифрового представления физического объекта. Однако для промышленного применения такое понимание является недостаточным. Цифровая копия может достаточно подробно описывать устройство или состояние объекта и одновременно практически не влиять на управление им [1, 4–8].

В настоящем исследовании промышленный цифровой двойник рассматривается как интегрированное цифровое представление производственного объекта, объединяющее фактические данные, инженерные модели и аналитические функции для понимания текущего состояния, оценки возможного развития и поддержки решений [4, 7, 8, 10, 11, 29].

В таком определении принципиально важны три составляющие. Первая — непосредственная связь цифровой системы с физическим объектом и его фактическим состоянием. Вторая — способность использовать инженерные и аналитические модели для содержательной интерпретации информации. Третья — наличие управленческого сценария, в рамках которого полученный результат используется при выборе дальнейшего действия [1, 6, 7, 10–12].

Последняя составляющая позволяет отличить зрелый промышленный цифровой двойник от системы визуализации либо объединенного информационного пространства. Наличие трехмерной модели, единого интерфейса или большого количества подключенных источников данных само по себе не свидетельствует о высокой управленческой ценности системы [1, 5, 6, 24].

В настоящем исследовании предлагается рассматривать последовательное развитие управленческого использования цифрового двойника от наблюдения к диагностике, прогнозированию, сценарному анализу, оптимизации и поддержке решения [7, 20, 22, 24].

На уровне наблюдения основная задача заключается в формировании достоверного представления о текущем состоянии объекта. Такая функция уже способна создавать существенную ценность, если до внедрения информация была распределена между несколькими источниками, поступала с задержкой либо требовала значительных затрат на сопоставление.

Следующий уровень связан с диагностикой. Цифровая модель используется для анализа причин отклонений и понимания механизмов, определяющих текущее состояние производственной системы [5, 7, 20].

Прогнозирование добавляет временное измерение и позволяет оценивать вероятное развитие объекта. Сценарный анализ расширяет эту возможность, позволяя сравнивать

последствия различных изменений до непосредственного воздействия на физическую систему. Для капиталоемкого производства такая функция особенно существенна, поскольку реальный эксперимент способен сопровождаться производственными потерями, риском или дополнительными затратами [7, 14, 17, 20].

Следующим уровнем становится оптимизация. Однако понятие оптимального режима не может определяться цифровой системой независимо от целей организации. Максимальная производительность, минимальная стоимость, надежность, энергопотребление и технологическая безопасность способны формировать различные критерии выбора. Поэтому оптимизация представляет не только математическую, но и управленческую задачу: организация должна определить цели, приоритеты и ограничения, внутри которых модель осуществляет поиск предпочтительного решения [7, 17, 20].

Наиболее зрелым состоянием становится включение результатов цифрового двойника в реальный процесс подготовки и принятия решений. При этом речь идет именно о поддержке решения, а не об автоматическом замещении профессионального суждения. Чем выше возможные последствия действия для физического актива, тем более существенными становятся прозрачность исходных данных, понимание ограничений модели и определенность ответственности за практическое использование результата [7, 17, 21].

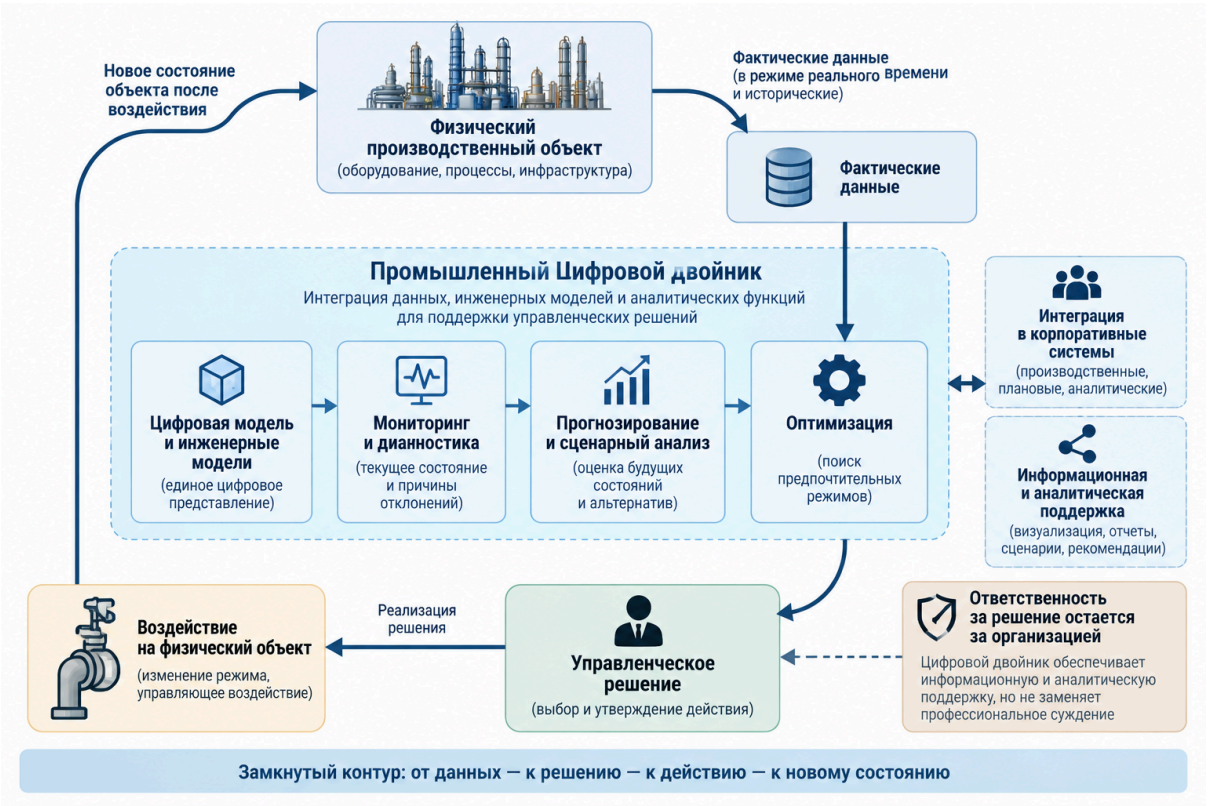


Рисунок 1. Промышленный цифровой двойник в контуре принятия управленческих решений

Таблица 1. Уровни управленческого использования промышленного цифрового двойника

Уровень	**Основная функция**	**Управленческий вопрос**	**Требование к системе**
Наблюдение	Отображение текущего состояния	Что происходит с объектом?	Доступность и актуальность данных
Диагностика	Анализ причин отклонений	Почему произошло изменение?	Согласованность данных и моделей

Прогнозирование	Оценка будущего состояния	Что вероятнее всего произойдет далее?	Проверенные модели и понимание неопределенности
Сценарный анализ	Сравнение вариантов	Что произойдет при изменении условий?	Возможность моделирования альтернатив
Оптимизация	Поиск предпочтительного режима	Какой вариант лучше относительно заданных целей?	Ясные критерии и ограничения
Поддержка решения	Использование результата в реальной деятельности	Какое действие следует предпринять?	Ответственность, процессы и доверие к результату

Источник: разработано автором с учетом подходов [7, 20, 22, 24].

Переход между уровнями связан не только с усложнением аналитических возможностей. Одновременно возрастают требования к информационной и организационной зрелости. Для наблюдения принципиальна надежность фактической информации. Для прогнозирования необходимо понимать точность и область применимости моделей. Оптимизация требует явного определения целей и ограничений. Использование результатов для значимых решений предполагает установленную ответственность за интерпретацию и последующее действие [7, 20, 22, 24].

Таким образом, зрелость промышленного цифрового двойника целесообразно оценивать не по количеству реализованных функций и не по детализации цифрового

изображения объекта, а по способности системы улучшать качество конкретных производственных и управленческих решений [20, 22, 24].

3. Методология исследования

Настоящая работа имеет концептуально-аналитический характер. Объектом исследования является внедрение промышленного цифрового двойника в капиталоемкой производственной организации, а предметом — совокупность управленческих условий, обеспечивающих переход от технической готовности цифровой модели к ее устойчивому использованию в фактических процессах принятия решений.

Методологическую основу составляют системный анализ, структурная декомпозиция жизненного цикла и концептуальный синтез условий внедрения.

Системный анализ применяется вследствие того, что промышленный цифровой двойник объединяет объекты различной природы: физический актив, потоки данных, инженерные модели, программную архитектуру, производственные процессы и организационную систему принятия решений. Результат внедрения зависит не только от качества каждого компонента, но и от их согласованного взаимодействия [8, 10, 11, 23].

Структурная декомпозиция используется для разделения процесса внедрения на управленческие состояния. В отличие от исключительно технологического жизненного цикла, в котором центральное место занимают проектирование, разработка и техническое тестирование, предлагаемая структура начинается с определения бизнес-задачи и завершается подтверждением ценности и решением о масштабировании [12, 13, 25].

Концептуальный синтез применяется для установления связей между стадиями жизненного цикла, уровнем использования цифрового двойника и условиями его промышленной эксплуатации. В результате формируется модель, в которой развитие технологической функциональности рассматривается совместно с развитием информационного и организационного контуров [8, 24, 25].

Профессиональный опыт автора в реализации и кураторстве сложных цифровых инициатив используется как иллюстративная основа для содержательной интерпретации выявленных взаимозависимостей. В частности, практический материал включает проект цифрового двойника газоконденсатного производственного актива, в котором объединялись модели пласта, скважин, системы сбора и объектов подготовки продукции, а цифровой контур включал мониторинг, автоматическую адаптацию моделей, прогнозные расчеты и анализ режимов работы. Данный пример используется для иллюстрации системной природы промышленного цифрового двойника и не рассматривается как эмпирическое подтверждение универсальности предлагаемой модели [29].

Предлагаемые положения требуют последующей проверки на более широком массиве промышленных проектов. Поэтому задача исследования заключается прежде всего в формировании концептуальной структуры, пригодной для дальнейшего сравнительного и количественного анализа.

4. Стратегическая модель жизненного цикла внедрения промышленного цифрового двойника

Стратегический жизненный цикл промышленного цифрового двойника должен начинаться не с выбора технологии, а с определения задачи, для решения которой создается цифровая система. Обратная последовательность, при которой сначала определяется продукт, а затем осуществляется поиск вариантов его применения, повышает риск формирования технически развитой, но организационно невостребованной системы [9, 12, 13, 25].

Первым состоянием жизненного цикла поэтому является бизнес-задача. Необходимо определить проблему или возможность, имеющую существенное производственное либо экономическое значение. Такой задачей может быть повышение качества прогнозирования, снижение потерь, сокращение простоев, улучшение использования оборудования либо повышение обоснованности выбора технологического режима.

После этого формируется сценарий применения. Он определяет пользователя цифрового двойника, необходимую информацию, решение, которое должно измениться благодаря новой системе, и ожидаемые последствия такого изменения. Наличие

четкого сценария позволяет ограничить первоначальный объем проекта и избежать стремления включить в цифровой двойник все потенциально доступные данные и модели [9, 12, 13, 20, 25].

Следующим состоянием является формирование гипотезы ценности. В промышленной среде она может включать прямой экономический результат и косвенные эффекты, связанные с надежностью, скоростью подготовки решения, качеством прогнозирования, использованием ресурсов или снижением отдельных типов риска [21, 26].

После определения ценности формируется система управления. Необходимо установить владельца конечного результата, распределить ответственность за технологию, данные и инженерные модели, определить полномочия участников и механизм согласования значимых межфункциональных решений [13, 21, 25].

На следующем этапе оценивается готовность информационной и технологической основы. Необходимость сложной цифровой архитектуры не должна скрывать отсутствие критических данных или недостаточную зрелость исходных моделей. Если фундаментальные ограничения выявлены до разработки, организация получает возможность устранить их значительно дешевле, чем после создания основной системы [13, 17, 23, 28].

Разработка и пилотирование предназначены прежде всего для проверки критических предположений. Задачей пилота является не демонстрация максимального количества функций, а подтверждение того, что выбранный сценарий технически реализуем, обеспечивает необходимое качество результата и способен быть встроен в реальную производственную деятельность [13, 20, 25].

После подтверждения технической состоятельности происходит организационная интеграция. Определяются эксплуатационные роли, изменяются необходимые процессы и создается порядок фактического использования результатов цифрового двойника [13, 21, 25].

Переход в промышленную эксплуатацию означает смену характера ответственности. Система перестает быть временным проектным продуктом и становится частью

производственной среды, требующей постоянного сопровождения данных, моделей, инфраструктуры и правил использования [21, 25, 26].

Следующим состоянием является оценка фактической ценности. Организация должна вернуться к исходной гипотезе и установить, произошли ли ожидаемые изменения. Только после этого появляются достаточные основания для функционального расширения или распространения решения на другие объекты [21, 25, 26].

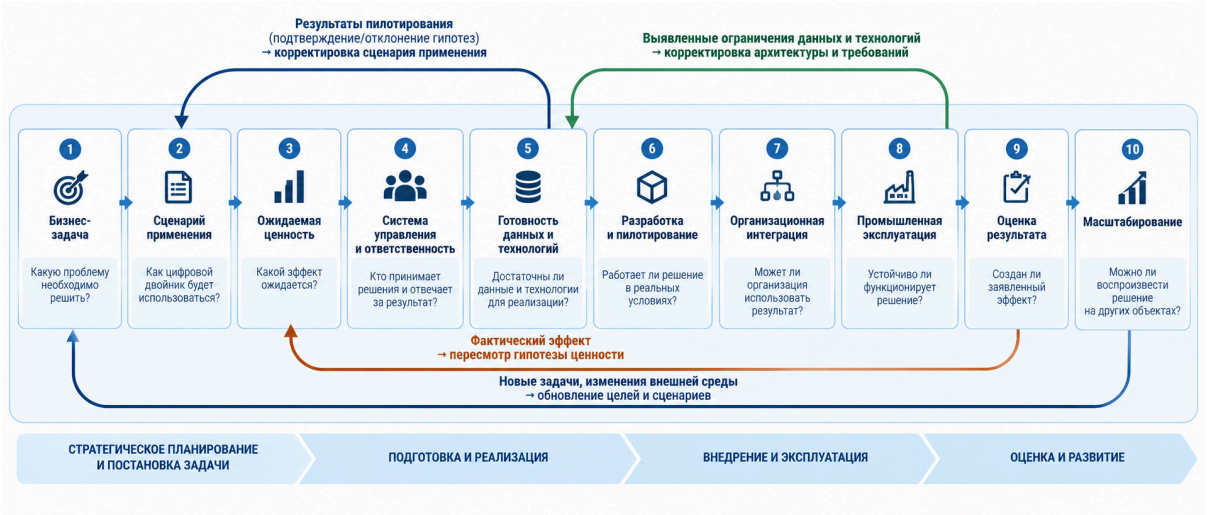


Рисунок 2. Стратегический жизненный цикл внедрения промышленного цифрового двойника

Таблица 2. Управленческие состояния жизненного цикла промышленного цифрового двойника

Состояние	**Основной вопрос**	**Ключевой результат**	**Условие перехода**
Бизнес-задача	Какую проблему необходимо решить?	Определенная цель	Подтверждена значимость задачи

Сценарий применения	Как цифровой двойник будет использоваться?	Конкретный процесс решения	Определены пользователь и решение
Ожидаемая ценность	Какой эффект оправдывает проект?	Проверяемая гипотеза ценности	Определены измеримые результаты
Система управления	Кто принимает решения и отвечает за результат?	Закрепленная ответственность	Полномочия соответствуют задачам
Данные и технология	Возможно ли создать надежную систему?	Подтвержденная готовность	Критические ограничения известны
Пилотирование	Работает ли решение в реальных условиях?	Проверенные предположения	Ключевые функции подтверждены
Организационная интеграция	Может ли организация использовать результат?	Измененные процессы и роли	Система включена в работу

Эксплуатация	Устойчиво ли функционирует решение?	Постоянная эксплуатационная модель	Определена ответственность за развитие
Оценка ценности	Создан ли заявленный эффект?	Подтвержденный результат	Получены фактические показатели
Масштабирование	Можно ли воспроизвести решение?	Модель дальнейшего развития	Ценность и воспроизводимость подтверждены

Источник: разработано автором с учетом [9, 12, 13, 21, 25].

Таким образом, управленческий жизненный цикл не является строго линейным. На каждом этапе может возникнуть информация, требующая пересмотра предыдущих предположений. Именно наличие такой обратной связи отличает стратегическое внедрение от последовательного выполнения заранее определенного технического плана [25].

5. Критические условия промышленного внедрения

Первым критическим условием является целостность информационно-модельного контура. Промышленный цифровой двойник может одновременно использовать фактические измерения, исторические данные, расчетные параметры и результаты нескольких инженерных моделей. Надежность итогового вывода зависит не только от качества отдельных источников, но и от того, насколько согласованы их определения, временные горизонты и предположения [17, 23, 28].

Пользователь должен иметь возможность понимать происхождение информации и отличать непосредственное измерение от расчетного значения. Если корпоративные системы содержат различные значения одного показателя, необходимо установить

правила их сопоставления и определить источник, используемый в конкретном сценарии принятия решения [23, 28].

Особую сложность представляет интеграция инженерных моделей, первоначально созданных для разных профессиональных задач. Геологические, скважинные и наземные модели способны использовать разную пространственную и временную детализацию. В нефтеперерабатывающих и химических производствах аналогичная проблема возникает при соединении моделей отдельных технологических стадий и установок в общий цифровой контур. Следовательно, интеграция требует не только программной совместимости, но и согласования физических предположений, границ применимости и правил обновления моделей [17–19, 23, 28].

Вторым условием является наличие конкретного сценария управленческого использования. Если невозможно определить, какое действие будет выполняться иначе вследствие появления новой информации, ценность соответствующей цифровой функции остается неопределенной. Поэтому каждую значимую функцию цифрового двойника целесообразно связывать с пользователем, решением и ожидаемым результатом [9, 12, 20].

Третьим условием является распределение ответственности. Создание промышленного цифрового двойника требует участия нескольких профессиональных функций, и ни одна из них не может единолично отвечать за всю систему. Технические специалисты не определяют самостоятельно физический смысл всех моделей, производственное подразделение не отвечает за программную архитектуру, а внешний разработчик не может нести ответственность за фактическую реализацию экономического результата внутри организации.

Поэтому необходимо отдельно определить ответственность за технологическую работоспособность, данные и модели, эксплуатационное использование и конечный результат [13, 21, 25].

Четвертым условием является профессиональное доверие к результату. Чем существеннее последствия решения, тем важнее понимание возможностей и ограничений модели. Высокая расчетная точность не должна интерпретироваться как отсутствие неопределенности. Пользователь должен понимать, на каких данных и

предположениях основана рекомендация и при каких условиях ее надежность может снизиться [7, 17, 20].

Пятым условием является сохранение управленческой архитектуры после технического запуска. Если одновременно с завершением проекта исчезает функция, отвечающая за дальнейшее развитие, цифровой двойник начинает постепенно терять актуальность. Следовательно, проектное управление должно трансформироваться в эксплуатационное: с ответственностью за данные, модели, технологическую инфраструктуру, пользователей и последующее развитие системы [13, 21, 25, 26].

Эти условия образуют связанную систему. Недостаток одного компонента способен ограничить ценность остальных: качественная модель теряет практическое значение без данных, надежная информационная основа — без сценария применения, а технически завершенная система — без эксплуатационной ответственности [13, 17, 20, 23].

6. Причины потери ожидаемой ценности и управленческие риски

Промышленный цифровой двойник способен быть технически состоятельным и одновременно не достигнуть ожидаемого результата. Причины такого разрыва редко действуют изолированно. Чаще возникает последовательность взаимно усиливающих ограничений.

Недостаточно определенная бизнес-задача приводит к расширению функциональности без понятного критерия ценности. Отсутствие критериев результата затрудняет решение о завершении пилота. Недостаточная готовность данных снижает доверие к модели, а недостаток доверия препятствует практическому использованию. Неопределенная ответственность, в свою очередь, осложняет устранение всех остальных ограничений [13, 14, 16, 20].

Таблица 3. Типовые причины потери ценности при внедрении промышленного цифрового двойника

Причина	**Характерное проявление**	**Последствие**	**Управленческий ответ**
Технология без четкой задачи	Проект начинается с выбора решения	Функциональность растет быстрее доказанной ценности	Вернуться к бизнес-задаче и сценарию применения
Неопределенная ответственность	Несколько владельцев отдельных компонентов	Общий результат не имеет владельца	Закрепить ответственность за конечную ценность
Недостаточная готовность данных	Различающиеся, неполные или недоступные данные	Снижается надежность моделей	Подготовить информационную основу до расширения решения
Разрыв инженерных и управленческих функций	Технический продукт развивается отдельно от пользователей	Система не встраивается в процессы	Совместно формировать сценарии решений
Организационное сопротивление	Сохраняются прежние способы работы	Формальный запуск не становится	Вовлекать пользователей в

		реальным внедрением	разработку и проверку
Отсутствие критериев результата	Успех оценивается фактом создания системы	Невозможно подтвердить ценность	Зафиксировать измеримые эффекты до разработки
«Вечный пилот»	Система многократно тестируется без перехода в эксплуатацию	Технология не превращается в устойчивую организационную способность	Установить условия решения о внедрении или прекращении
Преждевременное масштабирование	Решение тиражируется до подтверждения эффекта	Ошибки и затраты масштабируются вместе с продуктом	Подтвердить ценность и воспроизводимость до расширения

Источник: разработано автором на основе систематизации барьеров внедрения [13, 14, 16–20].

Особого внимания требует «вечный пилот». Технологическая команда продолжает совершенствовать систему, однако критерии достаточности заранее не определены, и организация не принимает решения ни о промышленном внедрении, ни о прекращении инициативы. Пилот перестает быть инструментом проверки предположений и превращается в устойчивое промежуточное состояние.

Поэтому до начала пилотирования необходимо установить, какие результаты будут означать подтверждение исходной гипотезы, какие отклонения потребуют корректировки и при каких условиях продолжение проекта становится нецелесообразным [13, 20, 25].

Противоположным риском является преждевременное масштабирование. Успешная техническая демонстрация способна создать стремление быстро распространить решение на другие активы, однако техническая работоспособность еще не подтверждает экономическую ценность и организационную воспроизводимость.

Следовательно, решение о масштабировании должно основываться как минимум на трех группах свидетельств: технической устойчивости, подтвержденном практическом результате и способности организации воспроизводить информационные и управленческие условия внедрения [12–14, 25, 27].

7. Отраслевая специфика и масштабирование промышленного цифрового двойника

Нефтегазовая, нефтеперерабатывающая и химическая промышленность объединены рядом характеристик, существенно влияющих на архитектуру и внедрение цифровых двойников. Производственная инфраструктура капиталоемка, активы эксплуатируются длительное время, процессы технологически взаимосвязаны, а решения одновременно затрагивают производительность, надежность, безопасность, использование ресурсов и экономические ограничения [14–19, 26].

Общим для этих отраслей является системный характер производственного объекта. Его итоговый результат нельзя свести к независимой сумме характеристик отдельных единиц оборудования. Ограничение одной части технологической цепочки способно изменить предпочтительный режим других компонентов, а локальное улучшение не обязательно приводит к улучшению системы в целом [14, 17–20].

В нефтегазовой промышленности этот принцип проявляется, в частности, во взаимосвязи пласта, скважин, системы сбора и объектов подготовки продукции. Изменение ограничений или режима одного элемента влияет на допустимые и предпочтительные состояния других компонентов [14–16].

Для нефтеперерабатывающих и химических производств системность проявляется через связанность последовательных технологических стадий, потоков сырья и промежуточных продуктов, режимов оборудования и ограничений отдельных производственных участков. Поэтому цифровой двойник приобретает наибольшую

ценность не как набор независимых моделей отдельных объектов, а как средство анализа взаимного влияния элементов технологической системы [17–19].

Промышленные цифровые двойники позволяют также соединять различные временные горизонты управления. Часть решений относится к текущему режиму эксплуатации, часть — к производственному планированию, надежности и обслуживанию, а некоторые решения имеют инвестиционный и стратегический характер. Использование единого цифрового контура потенциально позволяет обеспечить более последовательную связь между такими горизонтами, однако только при ясном понимании того, какие данные и модели пригодны для каждого класса решений [14, 17, 19, 21, 26].

Практической иллюстрацией системного подхода является проект цифрового двойника газоконденсатного актива, в котором объединялись модели пласта, скважин, системы сбора и объектов подготовки продукции. Цифровой контур включал автоматическую адаптацию и актуализацию моделей в режиме, близком к реальному времени, мониторинг состояния производственной системы, прогнозные расчеты и оценку различных режимов работы. Интеграция моделей позволяла анализировать влияние изменений состояния отдельных элементов на производственную систему в целом и использовать актуализируемое цифровое представление актива при подготовке производственных решений [29].

Данный пример относится к нефтегазовому активу и используется в настоящей работе как иллюстрация общей управленческой логики. Возможность непосредственного переноса конкретных архитектурных решений на нефтеперерабатывающие и химические предприятия не предполагается; для этих отраслей требуется самостоятельная адаптация с учетом структуры технологических процессов, данных и моделей [17–19].

Этот вывод имеет непосредственное значение для масштабирования. Успешный цифровой двойник одного производственного объекта не может механически копироваться на другой актив. Объекты отличаются конфигурацией оборудования, информационной зрелостью, качеством исторических данных, уровнем автоматизации и используемыми инженерными моделями [9, 12, 25, 27].

Поэтому при масштабировании необходимо разделять **универсальное ядро** и **объектно-специфические элементы**.

К универсальному ядру могут относиться архитектурные принципы, требования к данным, логика жизненного цикла, распределение ответственности, базовые аналитические механизмы и подход к оценке создаваемой ценности.

Объектно-специфическими остаются физические параметры оборудования, конфигурация производственной системы, конкретные инженерные модели, часть источников данных и отдельные сценарии применения [9, 12, 27].

Такое разделение определяет экономику масштабирования. Если для каждого нового объекта цифровой двойник создается практически заново, рост количества активов приводит к соответствующему росту затрат на проектирование, интеграцию и сопровождение. Если организация формирует воспроизводимое ядро, следующий проект становится его контролируемой адаптацией к конкретному производственному объекту [12, 25, 27].

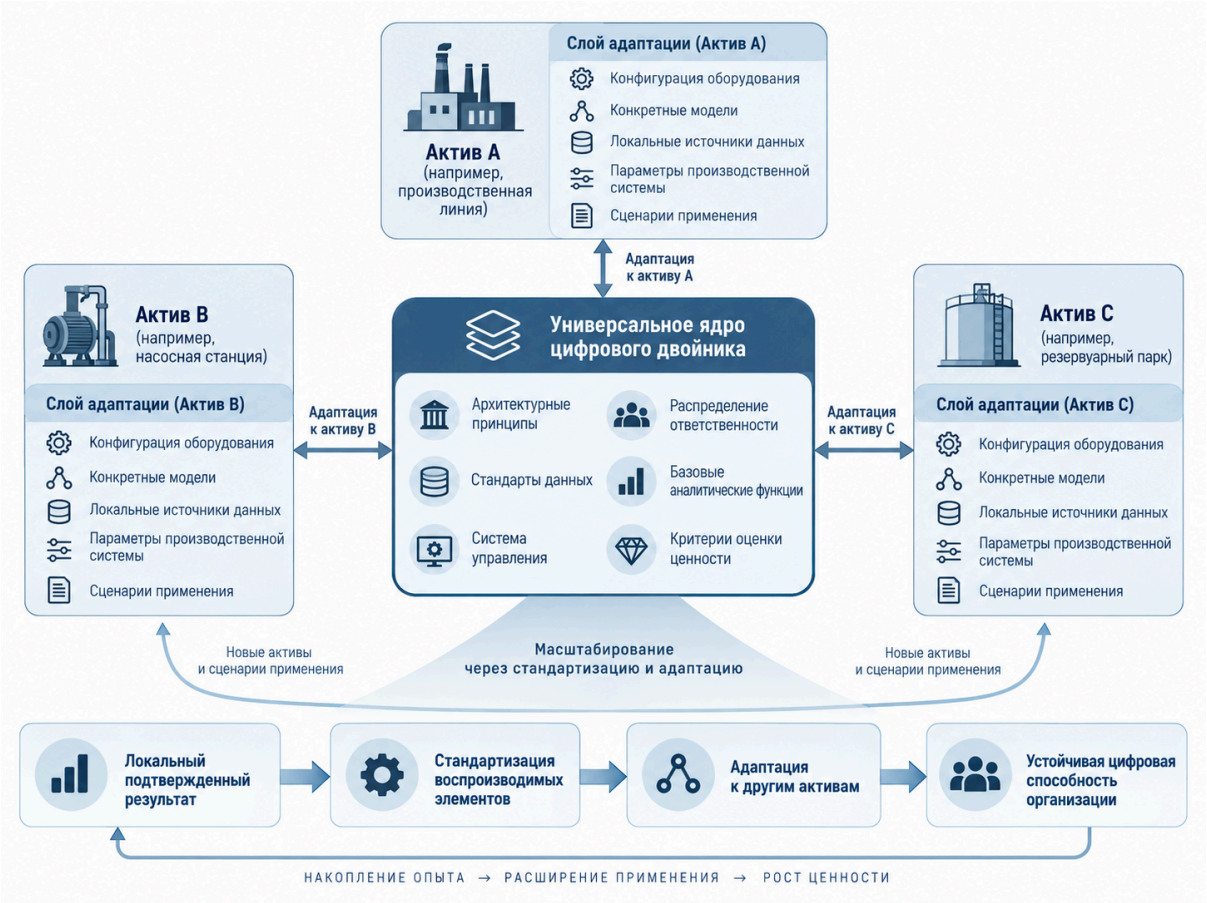


Рисунок 3. Архитектура масштабирования промышленного цифрового двойника: универсальное ядро и объектная адаптация

Таким образом, промышленное масштабирование представляет собой не тиражирование идентичного цифрового продукта, а управляемое сочетание стандартизации и объектной адаптации [12, 25, 27].

8. Обсуждение результатов и ограничения исследования

Проведенный анализ позволяет сформулировать несколько взаимосвязанных положений.

Первое связано с самим пониманием промышленного цифрового двойника. Его зрелость целесообразно оценивать не по степени детализации цифрового отражения объекта, а по уровню использования цифровой модели в реальном контуре решений. Наблюдение, диагностика, прогнозирование, сценарный анализ, оптимизация и поддержка решения отличаются не только аналитической сложностью, но и требованиями к информационной и организационной среде [20, 22, 24].

Второе положение касается жизненного цикла. Внедрение промышленного цифрового двойника следует рассматривать как управленческий процесс, начинающийся с бизнес-задачи. Технический запуск является промежуточным состоянием, поскольку окончательная результативность определяется последующим использованием системы и подтверждением создаваемой ценности [21, 25].

Третье положение заключается в том, что повышение аналитических возможностей цифрового двойника сопровождается ростом требований к управлению. Для наблюдения принципиальна надежность информации; прогнозирование требует понимания качества и ограничений моделей; оптимизация — формализации целей и ограничений; поддержка решения — установленной профессиональной и управленческой ответственности [7, 17, 20, 22].

Четвертое положение относится к промышленной специфике. Чем выше потенциальные последствия решения для физического актива, тем менее допустимо рассматривать результат цифровой модели как автономный источник управленческого действия. Цифровой двойник повышает информационное качество решения, однако не

устраняет необходимость профессиональной оценки, учета ограничений и распределения ответственности [7, 14, 17, 21, 26].

Пятое положение связано с масштабированием. Объектом масштабирования является не только техническое решение. Для устойчивого расширения необходимо воспроизводить архитектурные принципы, требования к данным, правила управления, эксплуатационную ответственность и механизм оценки результата. При этом конкретные инженерные модели и параметры физического объекта сохраняют необходимость локальной адаптации [9, 12, 25, 27].

Практическое значение предлагаемого подхода состоит в возможности использовать модель жизненного цикла в качестве структуры для принятия решений о продолжении, корректировке или прекращении цифровой инициативы. Вместо оценки проекта исключительно по выполнению технического задания организация получает возможность проверять последовательное подтверждение задачи, сценария использования, технологической осуществимости, организационной готовности и фактической ценности [12, 13, 21, 25].

Исследование имеет концептуальные ограничения. Предлагаемая модель не устанавливает количественную зависимость между отдельными условиями внедрения и величиной производственного или экономического эффекта. Профессиональный пример относится к цифровому двойнику газоконденсатного актива и используется как иллюстративный материал. Поэтому применимость отдельных положений к нефтеперерабатывающим и химическим производствам требует дальнейшей самостоятельной эмпирической проверки.

Перспективными направлениями последующего исследования являются сравнительный анализ цифровых двойников различных типов промышленных объектов, разработка количественных показателей зрелости жизненного цикла, исследование зависимости между уровнями управленческого использования цифрового двойника и требованиями к данным и моделям, а также оценка экономики масштабирования при различной степени стандартизации универсального ядра [22, 24, 25, 28].

9. Заключение

Промышленный цифровой двойник представляет собой не только цифровое отражение физического объекта, но и потенциальный инструмент системной поддержки управления производственным активом. Его ценность возрастает по мере перехода от наблюдения и диагностики к прогнозированию, сценарному анализу, оптимизации и практическому использованию результатов при принятии решений.

Для предприятий нефтегазовой, нефтеперерабатывающей и химической промышленности такой переход имеет особое значение вследствие капиталоемкости инфраструктуры, технологической взаимосвязанности процессов, длительных жизненных циклов активов и высокой стоимости ошибочных решений.

В настоящем исследовании предложено рассматривать внедрение промышленного цифрового двойника как последовательность управленческих состояний: от постановки бизнес-задачи и определения сценария применения до формирования гипотезы ценности, подготовки системы управления, информационной и технологической основы, пилотирования, организационной интеграции, промышленной эксплуатации, оценки результата и масштабирования.

Показано, что техническая готовность является необходимым, но недостаточным условием устойчивого внедрения. Результат зависит от согласованности данных, инженерных моделей, технологической архитектуры, процессов использования и организационной ответственности.

Установлена также зависимость между развитием функций цифрового двойника и требованиями к системе управления. Переход от наблюдения к прогнозированию, оптимизации и поддержке решений увеличивает требования к качеству информации, прозрачности моделей, формализации целей и ответственности за практическое использование результата.

Особое значение имеет сохранение прямой связи между цифровой функциональностью и исходной управленческой задачей. Дополнительная модель, источник данных или аналитическая функция оправданы в той мере, в какой они улучшают конкретное решение либо создают иной подтверждаемый результат для производственного актива.

Масштабирование промышленного цифрового двойника должно рассматриваться шире тиражирования программного продукта. Оно предполагает выделение

воспроизводимого технологического и управленческого ядра, стандартизацию необходимых данных и процессов и последующую адаптацию решения к особенностям каждого нового объекта.

Таким образом, стратегическое управление внедрением промышленного цифрового двойника заключается не в максимизации технологической сложности системы, а в последовательном преобразовании цифровой возможности в устойчивую способность организации принимать более обоснованные решения относительно физических производственных активов.

Список литературы

Я предлагаю **28 источников**. Для второй статьи это нормальный объем: здесь есть классические работы по цифровым двойникам, литература по зрелости и жизненному циклу, отдельный блок по процессным производствам, нефтегазовой и химической промышленности, а также стандарты. При этом первую статью Яны мы вообще не цитируем.

1. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine, 51*(11), 1016–1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
2. Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access, 5*, 20418–20427. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069.
3. Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94*, 3563–3576. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1.
4. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15*(4), 2405–2415. https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186.

5. Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry, 113*, 103130. https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130.
6. Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access, 8*, 108952–108971. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358.
7. Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access, 8*, 21980–22012. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143.
8. Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry, 130*, 103469. https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469.
9. Shao, G., & Helu, M. (2020). Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements. *Manufacturing Letters, 24*, 105–107. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.04.004.
10. ISO. (2021). *ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles.* International Organization for Standardization.
11. ISO. (2021). *ISO 23247-2:2021. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 2: Reference architecture.* International Organization for Standardization.
12. Moyne, J., Qamsane, Y., Balta, E. C., Kovalenko, I., Faris, J., Barton, K., & Tilbury, D. M. (2020). A Requirements Driven Digital Twin Framework: Specification and Opportunities. *IEEE Access, 8*, 107781–107801. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000437.
13. Perno, M., Hvam, L., & Haug, A. (2022). Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Computers in Industry, 134*, 103558. https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558.
14. Wanasinghe, T. R., Wroblewski, L., Petersen, B. K., Gosine, R. G., James, L. A., De Silva, O., Mann, G. K. I., & Warrian, P. J. (2020). Digital Twin for the Oil and Gas Industry: Overview, Research Trends, Opportunities, and Challenges. *IEEE Access, 8*, 104175–104197. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998723.

15. Lu, H., Guo, L., Azimi, M., & Huang, K. (2019). Oil and Gas 4.0 era: A systematic review and outlook. *Computers in Industry, 111*, 68–90. https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.007.
16. Belo, R. C., Pimenta, M. S., Salvador, T. T., Petry, R. H., & Abel, M. (2025). Fundamental requirements of Digital Twins for production system in Oil and Gas Industry: A systematic literature review. *Information and Software Technology, 184*, 107742. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2025.107742.
17. Peterson, L., Gosea, I. V., Benner, P., & Sundmacher, K. (2025). Digital twins in process engineering: An overview on computational and numerical methods. *Computers & Chemical Engineering, 193*, 108917. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108917.
18. Mane, S., Dhote, R. R., Sinha, A., & Thirumalaiswamy, R. (2024). Digital twin in the chemical industry: A review. *Digital Twins and Applications, 1*(2), 118–130. https://doi.org/10.1049/dgt2.12019.
19. Pal, P. K., Hens, A., Behera, N., & Lahiri, S. K. (2025). Digital twins: Transforming the chemical process industry—A review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering, 103*, 3611–3636. https://doi.org/10.1002/cjce.25611.
20. 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, 3*(1), 37–47. https://doi.org/10.1049/cim2.12010.
21. Macchi, M., Roda, I., Negri, E., & Fumagalli, L. (2018). Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management. *IFAC-PapersOnLine, 51*(11), 790–795. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.415.
22. Hu, W., Fang, J., Zhang, T., Liu, Z., & Tan, J. (2023). A new quantitative digital twin maturity model for high-end equipment. *Journal of Manufacturing Systems, 66*, 248–259. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.012.
23. Correia, J. B., Abel, M., & Becker, K. (2023). Data management in digital twins: A systematic literature review. *Knowledge and Information Systems, 65*(8), 3165–3196. https://doi.org/10.1007/s10115-023-01870-1.
24. Villegas, L. F., Macchi, M., & Polenghi, A. (2025). Digital twins in manufacturing: A unified conceptual framework. *Annual Reviews in Control, 60*, 101031. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2025.101031.

25. Villegas, L. F., Romero, D., Macchi, M., & Skoogh, A. (2026). Towards a Digital Twin Lifecycle Management Framework. *Enterprise Information Systems, 20*(8), 2616681. https://doi.org/10.1080/17517575.2026.2616681.
26. ISO. (2024). *ISO 55000:2024. Asset management — Vocabulary, overview and principles.* International Organization for Standardization.
27. ISO. (2026). *ISO 23247-6:2026. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 6: Digital twin composition.* International Organization for Standardization.
28. Liepert, C., Stary, C., Lamprecht, A., & Zügn, D. (2026). Interoperability of digital twin data exchange in engineering processes. *Research in Engineering Design, 37*, Article 30. https://doi.org/10.1007/s00163-026-00489-x.
29. Мишина Я. А. Формирование адаптивных механизмов управления проектами освоения месторождений с высокой сложностью геологических параметров // Russian Journal of Management. 2026. Т. 14. № 1. С. 370–389. DOI: 10.29039/2409-6024-2026-14-1-370-389.