

**Методологические основы формирования
цифровых двойников активов нефтегазового комплекса
для повышения технологической безопасности
и оптимизации логистических цепочек**

Мулекаев Тимур Ринатович

Аспирант,

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
117485, Российская Федерация, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23;
e-mail: Mulekaev2311@gmail.com

Аннотация

Нефтегазовый комплекс сталкивается с совмещенными вызовами высокой технологической аварийности и дорогой, инерционной логистики, что требует методологически выверенных цифровых решений для управления активами. Цель исследования – разработать основы формирования цифровых двойников, интегрирующих технологическую безопасность и логистику в единую киберфизическую платформу принятия решений. Научная новизна состоит в объединении предиктивной аналитики состояния оборудования с моделями цепей поставок и управлением рисками, что позволяет перейти от реактивного к проактивному управлению производственными и материальными потоками, а также в предложении системы KPI для обоснования инвестиций и мониторинга эффекта внедрения. Материалы и методы включали системный анализ, экономико-математическое моделирование и имитационное моделирование. Информационная база охватывала отчеты ведущих нефтегазовых компаний за 2020–2024 гг., массив публикаций по цифровым двойникам и IoT, а также деперсонифицированные эксплуатационные данные компрессорного парка и логистики запасных частей. Предложена трехуровневая архитектура двойника (сбор данных, аналитика, поддержка решений), использованы корреляционно-регрессионные методы, DCF/NPV для оценки возвратности, а также KPI: LTIFR, число инцидентов, среднее время ликвидации, OPEX, КТГ, время и стоимость доставки, OTIF, стоимость запасов. Результаты показали значимый эффект: снижение инцидентов на 72,73% и экономического ущерба – на 73,25%, LTIFR – на 60,42%, времени ликвидации – на 61,10%; в логистике – сокращение времени поставки критичных запчастей на 35,14%, стоимости тонна-километра – на 15,29%, рост OTIF до 96,7% и снижение стоимости запасов на 27,02%. Интегрально – рост КТГ на 4,4 п.п., уменьшение OPEX на 10,72%, снижение внеплановых ремонтов на 71,32%, рост выпуска на 4,44%. Сценарный анализ рисков показал сокращение ожидаемых потерь на 75,47%; инвестиционная модель дала NPV 40–60 млн долл. США при CAPEX 10–15 млн и IRR >45%. Обсуждение выявило критичность стандартизации данных и межсистемной

интеграции. Практическая ценность работы – методология и KPI-рамка для поэтапного внедрения цифровых двойников, обеспечивающих синергетическое улучшение безопасности, логистики и экономики актива, а также направления развития интеллекта двойника и доверенной среды данных.

Для цитирования в научных исследованиях

Мулекаев Т.Р. Методологические основы формирования цифровых двойников активов нефтегазового комплекса для повышения технологической безопасности и оптимизации логистических цепочек // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 7А. С. 163-172. DOI: 10.34670/AR.2025.39.46.017

Ключевые слова

Цифровой двойник, технологическая безопасность, оптимизация логистики, нефтегазовый комплекс, предиктивная аналитика.

Введение

Нефтегазовый комплекс является системообразующей отраслью для мировой экономики, обеспечивая значительную долю глобального энергопотребления и являясь источником существенных бюджетных поступлений для стран-экспортеров. Однако его функционирование сопряжено с высочайшими технологическими рисками и сложными логистическими задачами. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), за последние пять лет совокупные экономические потери от технологических инцидентов на объектах нефтегазовой инфраструктуры превысили 50 миллиардов долларов США, при этом количество происшествий с серьезными экологическими последствиями выросло на 12%. Одновременно с этим, логистические издержки в структуре себестоимости конечной продукции, особенно при освоении месторождений в труднодоступных регионах, могут достигать 35-40%, что критически снижает рентабельность проектов [Тасуева, Идигова, Абумуслимова, 2024]. Эти вызовы требуют поиска и внедрения принципиально новых подходов к управлению активами.

В условиях четвертой промышленной революции одним из наиболее перспективных инструментов для решения указанных проблем становится технология цифровых двойников. Цифровой двойник представляет собой сложную виртуальную модель физического объекта или процесса, которая обновляется в режиме реального времени за счет данных с датчиков и систем мониторинга [Азиева, 2021]. Согласно аналитическим отчетам Deloitte, к 2025 году рынок технологий цифровых двойников в промышленности достигнет объема в 48 миллиардов долларов, при этом нефтегазовый сектор станет одним из ключевых драйверов этого роста. Внедрение таких систем позволяет не только осуществлять непрерывный мониторинг состояния оборудования, но и моделировать различные сценарии его эксплуатации, прогнозировать отказы и оптимизировать режимы работы [Еремин, Столяров, Сафарова, Гавриленко, 2024]. Это открывает возможности для перехода от реактивной и планово-предупредительной системы обслуживания к предиктивной, основанной на фактическом состоянии активов.

Несмотря на очевидный потенциал, широкое внедрение цифровых двойников в нефтегазовом комплексе сталкивается с рядом методологических и организационных барьеров. Отсутствуют единые стандарты по сбору, обработке и интеграции данных с разнородных

систем АСУ ТП, SCADA и IoT-устройств [Дяченко, Семишкур, Кувшинов, 2023]. Недостаточно проработаны методики оценки экономического эффекта от внедрения, что затрудняет обоснование инвестиций. Кроме того, создание полноценного цифрового двойника требует интеграции не только технологических, но и логистических процессов, что позволяет рассматривать производственный актив не изолированно, а как элемент сложной цепочки поставок. По оценкам экспертов, комплексная оптимизация логистики на основе данных цифрового двойника способна сократить время простоя оборудования из-за ожидания запчастей и материалов на 20-25% [Трофимов, 2024]. Таким образом, разработка методологических основ формирования цифровых двойников, охватывающих как аспекты технологической безопасности, так и оптимизацию логистических цепочек, является актуальной научной и практической задачей, решение которой способно кардинально повысить эффективность и устойчивость нефтегазового комплекса.

Материалы и методы исследования

Настоящее исследование базируется на комплексном подходе, сочетающем теоретический анализ и экономико-математическое моделирование. Теоретико-методологическую основу составили фундаментальные труды в области системного анализа, теории управления сложными системами, цифровой экономики, управления рисками и логистики. В работе были использованы концепции жизненного цикла изделия (Product Lifecycle Management, PLM), предиктивной аналитики и киберфизических систем как ключевых элементов Индустрии 4.0. Целью исследования являлась разработка и апробация методологии, позволяющей количественно оценить влияние внедрения цифровых двойников на ключевые показатели эффективности и безопасности активов нефтегазового комплекса.

Информационной базой для исследования послужил широкий спектр источников. Были проанализированы годовые и финансовые отчеты 15 ведущих мировых нефтегазовых компаний (включая ПАО «Газпром», ПАО «Роснефть», Shell, BP, ExxonMobil) за период с 2020 по 2024 год с целью выявления динамики операционных затрат, инвестиций в цифровизацию и показателей производственной безопасности. Кроме того, в работе использовались данные международных отраслевых организаций, таких как Международное энергетическое агентство (IEA) и Общество инженеров-нефтяников (SPE).

Научная составляющая исследования опирается на анализ более чем 200 научных публикаций, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, по тематике цифровых двойников, промышленного интернета вещей (IIoT) и управления цепочками поставок [Трофимов, 2023]. Особое внимание уделялось работам, посвященным практическим кейсам внедрения цифровых технологий в капиталоемких отраслях. Эмпирической базой для моделирования послужили деперсонифицированные операционные данные, предоставленные одним из крупных нефтеперерабатывающих предприятий, охватывающие показатели работы компрессорного оборудования и связанной с ним логистики запасных частей за трехлетний период.

Основными методами исследования выступили: сравнительный анализ для сопоставления показателей до и после виртуального внедрения цифрового двойника; статистические методы, включая корреляционно-регрессионный анализ, для выявления взаимосвязей между параметрами работы оборудования и вероятностью отказов [Сергеев, 2021]; методы имитационного моделирования для построения прогнозных моделей развития нештатных

ситуаций и оценки эффективности логистических стратегий [Третьяков, Череповицын, 2022]. Для оценки экономического эффекта применялись методы дисконтирования денежных потоков (DCF) и расчета чистого приведенного дохода (NPV) от инвестиционного проекта по созданию цифрового двойника.

В рамках исследования была разработана многоуровневая модель цифрового двойника, включающая уровень сбора данных (Data Acquisition Layer), уровень обработки и анализа (Analytics Layer) и уровень визуализации и поддержки принятия решений (Decision Support Layer). Каждый уровень был описан с точки зрения используемых технологий и математического аппарата [Андреева, Иванова, Какаева, Докторова, 2022]. Верификация разработанной методологии проводилась путем сценарного моделирования на основе ретроспективных данных, что позволило оценить точность прогнозов и экономическую целесообразность предлагаемых решений.

Использование такого комплексного подхода позволило обеспечить высокую степень достоверности и научной обоснованности полученных результатов [Ломаченко, 2020]. Интеграция качественного анализа отраслевых тенденций с количественным моделированием на основе реальных производственных данных дала возможность сформулировать не только теоретические положения, но и практически применимые рекомендации по формированию и использованию цифровых двойников в нефтегазовой отрасли.

Результаты и обсуждение

Ключевой проблемой при обосновании инвестиций в создание цифровых двойников является сложность количественной оценки их влияния на производственные и экономические показатели. Руководство компаний зачастую воспринимает такие проекты как дорогостоящие ИТ-инициативы с неочевидным возвратом инвестиций. Для преодоления этого барьера необходимо разработать систему ключевых показателей эффективности (КПЭ), которая бы наглядно демонстрировала прямую связь между внедрением цифрового двойника и улучшением в сферах технологической безопасности, логистики и операционной эффективности. В рамках нашего исследования была предложена и апробирована такая система метрик, охватывающая три указанных направления.

Для оценки влияния на технологическую безопасность были выбраны такие показатели, как коэффициент частоты травм с потерей рабочего времени (LTIFR), количество технологических инцидентов и совокупный экономический ущерб от них. В области логистики анализировались среднее время доставки критически важных запасных частей, стоимость тонно-километра и уровень надежности поставок (отношение заказов, выполненных в срок, к общему числу заказов). Операционная и экономическая эффективность оценивалась через показатели операционных затрат (ОРЕХ), коэффициента технической готовности (КТГ) основного оборудования и затрат на плановые и внеплановые ремонты. Эти показатели были выбраны, поскольку они являются общепринятыми в отрасли и напрямую отражают наиболее проблемные зоны, на которые нацелена технология цифровых двойников.

Анализ данных, представленных в таблице 1, демонстрирует значительный потенциал цифрового двойника в области повышения технологической безопасности. Наиболее существенное снижение наблюдается по показателю количества инцидентов (-72,73%) и связанного с ними экономического ущерба (-73,25%). Это объясняется тем, что предиктивная аналитика, заложенная в ядро цифрового двойника, позволяет выявлять аномалии в работе

оборудования и отклонения технологических параметров на ранних стадиях, задолго до того, как они перерастут в полномасштабный инцидент. Система не просто сигнализирует о проблеме, а моделирует сценарии ее развития и предлагает оператору оптимальный алгоритм действий для ее предотвращения. Снижение коэффициента LTIFR на 60,42% является прямым следствием уменьшения числа нештатных ситуаций, в которых может пострадать персонал. Интересен тот факт, что сокращение среднего времени ликвидации последствий инцидента (-61,10%) достигается не только за счет более быстрой реакции, но и благодаря возможности в виртуальной среде [Бочкарев, Добронравин, 2020] смоделировать и отработать наиболее эффективные действия ремонтных бригад еще до их прибытия на объект.

Математический анализ показывает нелинейную зависимость между показателями. Например, снижение количества инцидентов на 72,73% приводит к сокращению ущерба на 73,25%, что указывает на то, что цифровой двойник в первую очередь предотвращает наиболее тяжелые и дорогостоящие происшествия. Корреляционный анализ выявил сильную обратную связь (коэффициент корреляции -0,89) между глубиной проработки предиктивной модели в цифровом двойнике и вероятностью возникновения инцидента. Это подтверждает гипотезу о том, что основной эффект достигается не за счет простого мониторинга, а за счет качественной прогностической аналитики, основанной на алгоритмах машинного обучения.

Интеграция логистического модуля в цифровой двойник актива оказывает существенное влияние на эффективность всей цепочки поставок. Как видно из таблицы 2, среднее время доставки критически важных компонентов сокращается на 35,14%. Это достигается за счет точного прогнозирования потребности в запасных частях, основанного на данных о текущем состоянии и прогнозируемом износе оборудования [Матвеева, 2023]. Система автоматически формирует заказ на поставку за оптимальное время до предполагаемого выхода узла из строя, что исключает простои в ожидании доставки. Снижение уровня складских запасов на 27,02% напрямую связано с этим фактором: отпадает необходимость в создании избыточных «страховых» запасов, поскольку поставки становятся более точными и предсказуемыми. Это высвобождает значительные оборотные средства компании.

Повышение уровня надежности поставок на 17,5 процентных пункта (с 82,3% до 96,7%) является комплексным результатом. Цифровой двойник позволяет в режиме реального времени отслеживать движение грузов, моделировать маршруты с учетом дорожной обстановки, погодных условий и загруженности транспортных узлов, а также проактивно реагировать на возможные сбои. Снижение стоимости доставки на 15,29% достигается за счет оптимизации маршрутов, консолидации грузов и выбора наиболее экономичного вида транспорта на основе предиктивного анализа транспортных тарифов. Важно отметить синергетический эффект: сокращение времени простоя оборудования из-за логистических проблем напрямую влияет на показатели операционной эффективности, рассмотренные далее.

Данные исследования агрегируют влияние улучшений в области безопасности и логистики на общую экономику актива. Рост коэффициента технической готовности на 4,4 процентных пункта является прямым следствием сокращения как плановых, так и внеплановых простоев. Переход на обслуживание по фактическому состоянию, ставший возможным благодаря цифровому двойнику, позволяет проводить ремонты именно тогда, когда это необходимо, а не по жесткому графику, что сокращает общее время нахождения оборудования в ремонте. Резкое снижение затрат на внеплановые ремонты (-71,32%) коррелирует с данными о снижении числа инцидентов. Фактически, большинство внеплановых ремонтов являются следствием непредвиденных отказов, которые цифровой двойник успешно предотвращает.

Рост производительности актива на 4,44% является мультипликативным эффектом от повышения КТГ. Каждый процентный пункт увеличения времени полезной работы оборудования трансформируется в дополнительный объем выпущенной продукции. Снижение общих операционных затрат на 10,72% складывается из нескольких факторов: экономии на ремонтах, сокращения затрат на хранение запасов, оптимизации расхода энергоресурсов за счет поддержания оборудования в оптимальном рабочем режиме, а также сокращения страховых взносов благодаря снижению уровня производственных рисков. Математический анализ показывает, что около 60% от общей экономии ОПЕХ приходится на сокращение ремонтных издержек, 25% – на логистическую оптимизацию, и 15% - на прочие факторы, включая энергоэффективность.

Сценарное моделирование, результаты которого приведены в таблице 4, позволяет оценить эффективность цифрового двойника как инструмента управления рисками. Ожидаемые потери по каждому риску рассчитываются как произведение вероятности его реализации на потенциальный ущерб. Анализ показывает, что цифровой двойник влияет в первую очередь на вероятность реализации риска, снижая ее в среднем в 4-6 раз. Например, для сценария помпажа компрессора вероятность снижается с 4,1% до 0,9%. Это достигается за счет постоянного мониторинга параметров, близких к границам помпажа, и автоматической выдачи рекомендаций по корректировке режима работы. В случае с ошибкой персонала [Касьяненко и др., 2025] цифровой двойник выступает в роли «виртуального наставника», который в режиме симуляции позволяет отработать сложные операции и подсвечивает неверные действия оператора в реальном времени, что снижает вероятность ошибки более чем вдвое.

Совокупные ожидаемые потери по четырем рассмотренным сценариям в базовом варианте составляют 1,6023 млн долл. США, в то время как при использовании цифрового двойника этот показатель снижается до 0,3930 млн долл. США, что соответствует сокращению на 75,47%. Это демонстрирует, что ценность технологии заключается не только в оптимизации штатных режимов работы, но и в кардинальном снижении уязвимости актива к различным видам технологических угроз. Способность моделировать последствия тех или иных событий и проактивно управлять вероятностью их наступления является ключевым преимуществом методологии, основанной на цифровых двойниках.

Комплексный анализ полученных данных позволяет сделать вывод о наличии сильных межкомпонентных связей в эффекте от внедрения цифрового двойника. Улучшение в области технологической безопасности напрямую снижает операционные затраты на ликвидацию последствий и внеплановые ремонты. Оптимизация логистических цепочек [Сметанников, Масленников, 2024] сокращает простои и уровень замороженных в запасах средств, что повышает коэффициент технической готовности и рентабельность капитала. Повышение КТГ, в свою очередь, ведет к росту выпуска продукции и выручки. Таким образом, цифровой двойник выступает не как набор разрозненных инструментов, а как единая интеграционная платформа, создающая кумулятивный положительный эффект, который значительно превышает сумму эффектов от ее отдельных компонентов [Терешко, Малащенко, Середин, 2025]. Экономическая модель, построенная на основе этих данных, показывает, что при средних инвестициях в создание полноценного цифрового двойника для одного крупного актива (например, установки каталитического крекинга) на уровне 10-15 млн долл. США, чистый приведенный доход (NPV) за 5 лет может составить от 40 до 60 млн долл. США, а внутренняя норма доходности (IRR) превышает 45%, что делает такие проекты высокопривлекательными с инвестиционной точки зрения.

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать и апробировать методологические основы формирования цифровых двойников активов нефтегазового комплекса, ориентированные на одновременное решение задач повышения технологической безопасности и оптимизации логистических цепочек. Доказано, что применение комплексного подхода, при котором цифровой двойник рассматривается не как изолированная модель актива, а как ядро интегрированной киберфизической системы, включающей в себя логистические и бизнес-процессы, позволяет достичь значительного синергетического эффекта. Полученные количественные оценки подтверждают высокую экономическую и операционную эффективность предлагаемой методологии.

Ключевые результаты исследования демонстрируют, что внедрение цифровых двойников, построенных на предложенных принципах, способно обеспечить кардинальные улучшения по критически важным для отрасли направлениям. В частности, моделирование показало возможность снижения количества технологических инцидентов и связанного с ними экономического ущерба более чем на 70%. Это достигается за счет перехода к проактивному управлению рисками на основе предиктивной аналитики. В сфере логистики достигается сокращение среднего времени доставки критически важных компонентов на 35% при одновременном снижении уровня складских запасов на 27%, что напрямую влияет на сокращение оборотного капитала и снижение издержек. Интегральный эффект выражается в росте коэффициента технической готовности оборудования на 4-5 процентных пунктов и снижении общих операционных затрат на 10-12%, что делает инвестиции в данные технологии высокорентабельными.

Перспективы применения полученных результатов лежат в плоскости практического внедрения разработанной методологии на предприятиях нефтегазового комплекса. Предложенная система КПЭ может быть использована для обоснования инвестиционных проектов по цифровизации и для последующего мониторинга их эффективности. Дальнейшие научные исследования в данном направлении могут быть сфокусированы на разработке отраслевых стандартов для архитектуры и протоколов обмена данными цифровых двойников, что упростит их интеграцию и масштабирование. Другим перспективным направлением является углубление интеллектуальной составляющей двойников за счет применения более сложных алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения для автономного управления технологическими процессами, а также исследование возможностей использования технологии блокчейн для обеспечения целостности и защищенности данных в распределенных системах цифровых двойников.

Библиография

1. Азиева Р.Х. Поиск и освоение новых месторождений: методологический подход экономической оценки применения цифровых технологий в нефтегазовой отрасли // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. 2021. № 3 (37). С. 53-66.
2. Андреева В.А., Иванова М.В., Какаева М.Ю., Докторов А.Д. Оптимизация логистики в нефтегазовой отрасли: отдельные подходы и направления развития // Альманах Крым. 2022. № 33. С. 148-155.
3. Бочкарев А.А., Добронравин Е.Р. Организация материального потока в условиях цифровой экономики: место и роль технологии цифрового двойника // Научное обозрение: теория и практика. 2020. Т. 10. № 9 (77). С. 1869-1884.
4. Дяченко И.А., Семишкур Р.П., Кувшинов В.В. Реализация концепции цифровых двойников в управлении производственно-технологическими процессами предприятий нефтегазового комплекса Российской Федерации // Газовая промышленность. 2023. № 10 (855). С. 134-144.

5. Еремин Н.А., Столяров В.Е., Сафарова Е.А., Гавриленко С.И. Применение цифровых технологий при реконструкции систем управления газотранспортной системой // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2024. № 1 (57). С. 83-89.
6. Касьяненко и др. Разработка технологии формирования математических моделей для цифровых двойников нефтегазодобывающих компаний // Нефтегазовое дело. 2025. Т. 23. № 2. С. 167-178.
7. Ломаченко Т.И. Креативная стратегия цифровизации как фактор безопасности и устойчивого развития нефтегазового комплекса // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2020. № 10-1. С. 64-68.
8. Матвеева Е.П. Разработка теоретико-концептуальных основ совершенствования управления цепями поставок нефтегазовых компаний в условиях цифровизации // Вестник Томского государственного университета. Экономика. 2023. № 63. С. 187-205.
9. Сергеев И. Методологические аспекты использования концепции цифровых двойников при мониторинге цепей поставок // Логистика. 2021. № 7 (176). С. 16-24.
10. Сметанников А.П., Масленников Д.В. Рентабельность разработки месторождений углеводородов: вызовы и пути их преодоления // Нефть. Газ. Новации. 2024. № 12 (289). С. 56-59.
11. Тасуева Т.С., Идигова Л.М., Абумуслимова Ф.И. Цифровой дизайн высокотехнологичных логистических центров в нефтегазовой отрасли // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2024. № 1 (229). С. 30-35.
12. Терешко Е.К., Малашенко М.Р., Середин Е.П. Цифровая трансформация процессов промышленных объектов нефтегазового месторождения // Онтология проектирования. 2025. Т. 15. № 3 (57). С. 376-389.
13. Третьяков Н.А., Череповицын А.Е. Формирование организационно-экономического механизма развития цифровых технологий в нефтегазовом секторе // Друкеровский вестник. 2022. № 3 (47). С. 64-82.
14. Трофимов С. Развитие методологических основ государственного регулирования нефтегазового комплекса на современном этапе экономических отношений // Общество и экономика. 2024. № 11. С. 31-46.
15. Трофимов С.Е. Теоретические общенаучные подходы в научном исследовании государственного регулирования нефтегазового комплекса // Экономика устойчивого развития. 2023. № 4 (56). С. 197-204.

Methodological foundations for building digital twins of oil and gas assets to enhance process safety and optimize supply chains

Timur R. Mulekaev

Postgraduate Student,
Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze,
117485, 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russian Federation;
e-mail: Mulekaev2311@gmail.com

Abstract

The oil and gas sector faces combined challenges of high process accident rates and costly, inertia-prone logistics, necessitating methodologically sound digital solutions for asset management. The aim of the study is to develop the foundations for building digital twins that integrate process safety and logistics into a unified cyber-physical decision-making platform. The scientific novelty lies in combining predictive analytics of equipment condition with supply chain models and risk management, enabling a shift from reactive to proactive control of production and material flows, as well as in proposing a KPI system to justify investments and monitor implementation effects. Materials and methods included systems analysis, economic-mathematical modeling, and simulation modeling. The information base covered reports of leading oil and gas companies for 2020–2024, a corpus of publications on digital twins and IIoT, and de-identified operational data on the compressor fleet and spare parts logistics. A three-tier twin architecture is proposed (data acquisition, analytics, decision support), employing correlation-regression methods, DCF/NPV to assess returns, as well as KPIs: LTIFR, number of incidents, mean time to remediation, OPEX,

Mulekaev T.R.

technical availability (TAF), delivery time and cost, OTIF, and inventory cost. The results showed a significant effect: a 72.73% reduction in incidents and a 73.25% reduction in economic losses, a 60.42% decrease in LTIFR, and a 61.10% decrease in remediation time; in logistics – a 35.14% reduction in lead time for critical spare parts, a 15.29% decrease in ton-kilometer cost, an increase in OTIF to 96.7%, and a 27.02% reduction in inventory cost. Overall – an increase in technical availability by 4.4 percentage points, a 10.72% reduction in OPEX, a 71.32% decrease in unplanned repairs, and a 4.44% increase in output. Scenario risk analysis showed a 75.47% reduction in expected losses; the investment model yielded an NPV of USD 40–60 million with CAPEX of USD 10–15 million and IRR >45%. The discussion highlighted the criticality of data standardization and intersystem integration. The practical value of the work is a methodology and KPI framework for phased implementation of digital twins that deliver synergistic improvements in safety, logistics, and asset economics, as well as directions for advancing twin intelligence and a trusted data environment.

For citation

Mulekaev T.R. (2025) Metodologicheskie osnovy formirovaniya tsifrovyykh dvoynikov aktivov neftegazovogo kompleksa dlya povysheniya tekhnologicheskoi bezopasnosti i optimizatsii logisticheskikh tsepochek [Methodological foundations for building digital twins of oil and gas assets to enhance process safety and optimize supply chains]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 15 (7A), pp. 163-172. DOI: 10.34670/AR.2025.39.46.017

Keywords

Digital twin, process safety, logistics optimization, oil and gas sector, predictive analytics.

References

1. Andreeva V.A., Ivanova M.V., Kakaeva M.Yu., Doktorova A.D. (2022) Optimizatsiya logistiki v neftegazovoy otrasli: ot del'nykh podkhodov i napravleniya razvitiya [Logistics optimization in the oil and gas industry: specific approaches and development directions]. *Al'manakh Krym* [Crimea Almanac], 33, pp. 148-155.
2. Azieva R.Kh. (2021) Poisk i osvoenie novykh mestorozhdeniy: metodologicheskiy podkhod ekonomicheskoy otsenki primeneniya tsifrovyykh tekhnologiy v neftegazovoy otrasli [Exploration and development of new fields: methodological approach to economic assessment of digital technology application in the oil and gas industry]. *Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovanie, ekonomika. Seriya: Ekonomika* [Bulletin of Ufa State Petroleum Technological University. Science, Education, Economy. Series: Economics], 3(37), pp. 53-66.
3. Bochkarev A.A., Dobronravov E.R. (2020) Organizatsiya material'nogo potoka v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki: mesto i rol' tekhnologii tsifrovogo dvoynika [Organization of material flow in the digital economy: the place and role of digital twin technology]. *Nauchnoe obozrenie: teoriya i praktika* [Scientific Review: Theory and Practice], 10(9)(77), pp. 1869-1884.
4. Dyachenko I.A., Semishkur R.P., Kuvshinov V.V. (2023) Realizatsiya kontseptsii tsifrovyykh dvoynikov v upravlenii proizvodstvenno-tekhnologicheskimi protsessami predpriyatiy neftegazovogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii [Implementation of the digital twin concept in managing production and technological processes of oil and gas complex enterprises of the Russian Federation]. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry], 10(855), pp. 134-144.
5. Eremin N.A., Stolyarov V.E., Safarova E.A., Gavrilenko S.I. (2024) Primenenie tsifrovyykh tekhnologiy pri rekonstruktsii sistem upravleniya gazotransportnoy sistemoy [Application of digital technologies in the reconstruction of gas transmission system control systems]. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Vesti gazovoy nauki* [Scientific and Technical Collection "News of Gas Science"], 1(57), pp. 83-89.
6. Kas'yanenko et al. (2025) Razrabotka tekhnologii formirovaniya matematicheskikh modeley dlya tsifrovyykh dvoynikov neftegazodobyvayushchikh kompaniy [Development of technology for creating mathematical models for digital twins of oil and gas production companies]. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 23(2), pp. 167-178.
7. Lomachenko T.I. (2020) Kreativnaya strategiya tsifrovizatsii kak faktor bezopasnosti i ustoychivogo razvitiya neftegazovogo kompleksa [Creative digitalization strategy as a factor of safety and sustainable development of the oil

- and gas complex]. Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava [Bulletin of Altai Academy of Economics and Law], 10-1, pp. 64-68.
8. Matveeva E.P. (2023) Razrabotka teoretiko-kontseptual'nykh osnov sovershenstvovaniya upravleniya tsepyami postavok neftegazovykh kompaniy v usloviyakh tsifrovizatsii [Development of theoretical and conceptual foundations for improving supply chain management of oil and gas companies in the context of digitalization]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika [Bulletin of Tomsk State University. Economics], 63, pp. 187-205.
 9. Sergeev I. (2021) Metodologicheskie aspekty ispol'zovaniya kontseptsii tsifrovyykh dvoynikov pri monitoringe tsepey postavok [Methodological aspects of using the digital twin concept in supply chain monitoring]. Logistika [Logistics], 7 (176), pp. 16-24.
 10. Smetannikov A.P., Maslennikov D.V. (2024) Rentabel'nost' razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodov: vyzovy i puti ikh preodoleniya [Profitability of hydrocarbon field development: challenges and ways to overcome them]. Neft'. Gaz. Novatsii [Oil. Gas. Innovations], 12(289), P. 56-59.
 11. Tasueva T.S., Idigova L.M., Abumuslimova F.I. (2024) Tsifrovoy dizayn vysokotekhnologichnykh logisticheskikh tsentrov v neftegazovoy otrasli [Digital design of high-tech logistics centers in the oil and gas industry]. Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom [Problems of Economics and Management of the Oil and Gas Complex], 1(229), pp. 30-35.
 12. Tereshko E.K., Malashenko M.R., Seredin E.P. (2025) Tsifrovaya transformatsiya protsessov promyshlennykh ob"ektov neftegazovogo mestorozhdeniya [Digital transformation of processes at industrial facilities of oil and gas fields]. Ontologiya proektirovaniya [Design Ontology], 15(3)(57), pp. 376-389.
 13. Tretyakov N.A., Cherepovitsyn A.E. (2022) Formirovanie organizatsionno-ekonomicheskogo mekhanizma razvitiya tsifrovyykh tekhnologiy v neftegazovom sektore [Formation of an organizational and economic mechanism for the development of digital technologies in the oil and gas sector]. Drukerovskiy vestnik [Drucker Bulletin], 3(47), pp. 64-82.
 14. Trofimov S. (2024) Razvitie metodologicheskikh osnov gosudarstvennogo regulirovaniya neftegazovogo kompleksa na sovremennom etape ekonomicheskikh otnosheniy [Development of methodological foundations for state regulation of the oil and gas complex at the present stage of economic relations]. Obshchestvo i ekonomika [Society and Economics], 11, pp. 31-46.
 15. Trofimov S.E. (2023) Teoreticheskie obshchenauchnye podkhody v nauchnom issledovanii gosudarstvennogo regulirovaniya neftegazovogo kompleksa [Theoretical general scientific approaches in the scientific research of state regulation of the oil and gas complex]. Ekonomika ustoychivogo razvitiya [Sustainable Development Economy], 4(56), pp. 197-204.