УДК 622.692.4:004.9

Кривцов Глеб Александрович, магистрант 1 курса
(ДВФУ, г. Владивосток)
Gleb A. Krivtsov, first-year master's student
(FEFU, Vladivostok)

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ КАК ИНСТРУМЕНТЫ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ И ГАЗА

DIGITAL TWINS AND INTELLIGENT MONITORING AS TOOLS FOR IMPROVING THE SAFETY AND ENERGY EFFICIENCY OF OIL AND GAS PIPELINE TRANSPORT

Аннотация. Рассматриваются подходы к повышению надёжности и энергоэффективности магистрального транспорта нефти и газа на основе цифровых двойников и интеллектуального мониторинга. Приведены данные о снижении аварийности и энергозатрат.

Abstract. The article discusses approaches to improving the reliability and energy efficiency of main oil and gas transport based on digital twins and intelligent monitoring. Data on reducing accidents and energy consumption are presented.

Магистральные трубопроводы по праву считаются главными артериями топливно-энергетического комплекса России. От того, насколько стабильно они функционируют, напрямую зависят не только экспортные доходы страны, но и бесперебойная работа промышленных предприятий, а также экологическая ситуация в регионах. При этом нельзя забывать, что значительная часть трубопроводных систем проложена в суровых климатических условиях, имеет колоссальную протяженность и уже давно эксплуатируется. Все это неизбежно ведет к износу оборудования и требует принципиально новых подходов к диагностике и управлению.

В последние годы все чаще говорят о цифровизации отрасли. На смену классическим методам управления приходят системы, объединяющие данные с датчиков, сложные математические модели и алгоритмы машинного обучения. Особый интерес здесь вызывают технологии цифровых двойников и интеллектуального мониторинга. Они позволяют не просто фиксировать уже случившиеся отклонения, но и прогнозировать развитие нештатных ситуаций, что особенно важно для опасных производственных объектов [7].

В данной работе мы ставим перед собой цель обобщить практический опыт применения цифровых двойников и интеллектуального мониторинга для повышения безопасности и энергоэффективности транспорта углеводородов. Рассмотрим, как устроены подобные системы, какие алгоритмы лежат в их основе, и с какими трудностями сталкиваются компании при их внедрении.

Если объяснять простыми словами, цифровой двойник трубопровода - это его виртуальная копия, которая «живет» в режиме реального времени. Она синхронизируется с реальным объектом благодаря телеметрии, поступающей с датчиков давления, расхода и температуры. В отличие от обычных расчетных схем, цифровой двойник непрерывно подстраивается под текущие условия, учитывая гидравлику, теплообмен и даже напряженно-деформированное состояние труб. Очевидно, что чем точнее исходная физическая модель и чем качественнее данные с приборов учета, тем достовернее будут результаты расчетов [6].

С точки зрения архитектуры, цифровой двойник представляет собой многоуровневую систему. На нижнем уровне находится физический объект (сами трубы, насосные агрегаты, арматура). Информационный уровень отвечает за сбор и первичную обработку данных с КИПиА. Модельный уровень - это «мозг», где данные прогоняются через гидравлические и прочностные модели. Наконец, аналитический уровень включает в себя алгоритмы поддержки принятия решений для диспетчерского персонала. Именно такая связка позволяет использовать цифровой двойник не только для сиюминутного управления, но и для грамотного планирования ремонтов.

Один из самых ощутимых эффектов от внедрения цифрового двойника - это повышение точности обнаружения утечек. Классические методы, основанные на балансе расходов, к сожалению, часто дают сбои на протяженных участках со сложным профилем. Двойник же позволяет смоделировать идеальный гидравлический режим и сравнить его с фактическими показаниями приборов. Показателен пример коллег из Александрийского университета, которые предложили модель цифрового двойника для газопровода. Их разработка не только свела к нулю количество ложных срабатываний, но и определяла размер и место утечки с погрешностью менее 3,21% [1]. Это наглядно доказывает, что двойник - это полноценный инструмент диагностики, а не просто красивая визуализация.

Тем не менее, нельзя идеализировать технологию. На практике эффективность двойника сильно зависит от корректности настройки моделей и своевременного обновления данных об оборудовании. Если датчики врут или модель не учитывает местные сопротивления, пользы от системы не будет. Поэтому внедрение обязательно должно сопровождаться метрологической проверкой и обучением персонала [8].

Важнейшим дополнением к цифровому двойнику становятся системы интеллектуального мониторинга. Если обычная телеметрия просто «кричит» при выходе за заданные пороги, то алгоритмы машинного обучения способны уловить тонкие, многофакторные изменения в работе системы. Например, постепенный рост вибрации насоса или едва заметное падение давления, которое предшествует аварии.

Для поиска аномалий применяется широкий спектр инструментов: от нейросетей до методов статистического анализа. Причем не всегда есть возможность обучить модель на реальных данных об утечках (их просто мало). В таких случаях на помощь приходят подходы, основанные на поиске отклонений от нормального режима работы. Дополнительным подспорьем служит акустический мониторинг: утечка газа или нефти часто сопровождается характерным шумом, который человек может не услышать, а нейросеть - распознает без труда. Исследования показывают, что объединение данных от различных датчиков и алгоритмов ИИ существенно повышает скорость реагирования на инциденты [2].

Отдельного внимания заслуживает предиктивная аналитика, то есть прогнозирование отказов. Опираясь на историю работы насосного оборудования и запорной арматуры, можно строить модели, которые предсказывают вероятность поломки в ближайшем будущем. Это дает возможность перейти от привычного планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, что экономит значительные средства. Но здесь есть свой подводный камень: для качественного прогноза нужны большие и чистые массивы данных.

Кроме того, сложные нейросети часто работают по принципу «черного ящика». Диспетчеру бывает сложно понять, почему система выдала ту или иную рекомендацию. Поэтому на практике наиболее эффективным оказывается гибридный подход, где алгоритмы машинного обучения работают в связке с физическими моделями и экспертными правилами. Это позволяет не только выявить аномалию, но и объяснить ее причину.

Помимо безопасности, цифровые технологии напрямую влияют на экономику транспорта нефти и газа. Основным потребителем электроэнергии на магистралях являются нефтеперекачивающие станции. Неоптимальные режимы работы насосов приводят к перерасходу энергии и ускоренному износу оборудования.

Цифровой двойник дает возможность «проиграть» различные сценарии работы станций и выбрать тот, который обеспечит нужную производительность при минимальных энергозатратах. Интеллектуальная система мониторинга при этом отслеживает фактическое потребление и сигнализирует, если реальные показатели отклоняются от расчетного оптимума. Существенный вклад в энергосбережение вносит и внедрение частотно-регулируемых приводов (ЧРП). Как показывает практика последних лет, модернизация насосного парка и внедрение ЧРП позволяют нефтяным компаниям

экономить десятки миллионов киловатт-часов ежегодно [5]. Цифровые двойники в этом контексте выступают удобным инструментом для обоснования экономической эффективности таких проектов [3].

Кроме того, цифровые модели помогают учитывать сезонность и колебания спроса. Когда объемы перекачки падают, насосы вынуждены работать с недогрузкой, что ведет к росту удельного энергопотребления. Интеллектуальная система вовремя замечает такие режимы и предлагает пути их оптимизации, продлевая тем самым ресурс оборудования.

Внедрение цифровых двойников - это не только покупка софта, но и серьезная перестройка бизнес-процессов. Диспетчеры должны понимать логику работы системы и уметь проверять ее рекомендации. Инженерам приходится постоянно поддерживать актуальность моделей и следить за качеством исходных данных.

С нормативной точки зрения, при эксплуатации таких систем необходимо строго соблюдать требования в области промышленной безопасности. В частности, приходится учитывать положения Федерального закона № 116-ФЗ [7] и профильных правил Ростехнадзора для магистральных трубопроводов [4]. Важно, чтобы интеллектуальные системы не снижали общий уровень безопасности, а органично встраивались в существующую автоматику.

Среди главных проблем широкого внедрения стоит выделить высокую стоимость моделей, нехватку квалифицированных кадров (нужны специалисты на стыке гидравлики и IT) и вопросы кибербезопасности. Двойник - это часть IT-инфраструктуры, и его необходимо защищать от несанкционированного доступа. Ведь искажение данных может привести к фатальным ошибкам в управлении.

Перспективы здесь очевидны: это развитие гибридных моделей, углубление интеграции с системами предиктивной аналитики и переход к полностью автоматизированным системам управления. Но, как показывает опыт, лучше всего двигаться поэтапно: сначала опробовать двойник на отдельном узле, оценить эффект, а уже потом масштабировать на всю систему.

Подводя итог, можно сказать, что цифровые двойники и интеллектуальный мониторинг переводят управление трубопроводным транспортом на качественно новый уровень. Они делают диагностику более точной, позволяют предупреждать аварии, а также существенно экономить энергоресурсы. Комплексный эффект от внедрения выражается в повышении промышленной безопасности и снижении эксплуатационных затрат. Дальнейший прогресс в этой области будет связан с совершенствованием алгоритмов, обеспечением кибербезопасности и подготовкой новых инженерных кадров.

Список литературы

1. Слейти А.К. Надежная модель цифрового двойника для любых аномалий газо- и нефтепроводов с нулевым уровнем ложных срабатываний / А.К. Слейти, В.А. Аль-Аммари, Р. Хасан // Alexandria Engineering Journal. – 2025. – Vol. 123. – P. 1–15. – (дата обращения: 30.10.2026).
2. Исследование применения искусственного интеллекта в мониторинге утечек и прогнозировании рисков на магистральных трубопроводах // IEEE Xplore. – 2025. – URL: https://ieeexplore.ieee.org (дата обращения: 30.10.2026).
3. Управление эффективностью систем транспорта и хранения нефти и газа / Е.А. Балаганская [и др.]. – Zenodo, 2025. – 23 с. – URL: https://zenodo.org/records/18032680 (дата обращения: 30.10.2026).
4. Приказ Ростехнадзора от 11.12.2020 № 517 (ред. от 03.03.2026) «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности для опасных производственных объектов магистральных трубопроводов"» // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: http://pravo.gov.ru (дата обращения: 31.10.2026).
5. «Удмуртнефть» сэкономила 36 млн кВт·ч электроэнергии в 2025 году // Energyland.info. – 2026. – URL: https://eprussia.ru (дата обращения: 31.10.2026).
6. Коршак А.А. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов: учебное пособие / А.А. Коршак, А.М. Нечваль. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2008. – 320 с. – (дата обращения: 31.10.2026).
7. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: http://pravo.gov.ru (дата обращения: 31.10.2026).
8. ГОСТ Р 8.596-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с. – (дата обращения: 31.10.2026).