

Шадрин Дмитрий Сергеевич,
студент гр. ТБм - 23, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: shadrin_dmitriy_94@mail.ru

Игumenъцева Виктория Валерьевна,
к.б.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: viktoria_igumen@mail.ru

**ИНТЕГРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ
В СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ
БЕЗОПАСНОСТЬЮ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Shadrin D.S., Igumenshcheva V.V.

**INTEGRATION OF DIGITAL TWINS AND PREDICTIVE ANALYTICS
IN INDUSTRIAL SAFETY MANAGEMENT SYSTEM
OF PETROCHEMICAL ENTERPRISES**

Аннотация. Статья представляет обзор современных подходов к объединению технологий цифрового двойника (ЦД) и предиктивной аналитики (ПА) для повышения промышленной безопасности (ПБ) на предприятиях нефтехимической отрасли. На основе анализа отечественных и зарубежных источников сформулирована концептуальная архитектура интегрированной системы, описаны ключевые преимущества и ограничения технологии, а также обозначены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: промышленная безопасность, цифровой двойник, предиктивная аналитика, риск-ориентированный подход, нефтехимия.

Abstract. The article reviews contemporary approaches to integrating digital twin (DT) and predictive analytics (PA) technologies to enhance industrial safety (IS) at petrochemical enterprises. Based on an analysis of domestic and foreign sources, a conceptual architecture of the integrated system is proposed, the key advantages and limitations of the technology are described, and directions for further research are outlined.

Keywords: industrial safety, digital twin, predictive analytics, risk-based approach, petrochemicals.

Усложнение технологических процессов и ужесточение требований законодательства ставят перед нефтехимической отраслью задачу перехода к проактивному управлению рисками. Цифровой двойник (ЦД) обеспечивает целостное представление о состоянии оборудования, а предиктивная аналитика (ПА) делает возможным раннее выявление аномалий. Их интеграция рассматривается мировым сообществом как перспективный инструмент снижения вероятности аварий и оптимизации затрат на обслуживание.

Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий», ЦД – цифровая модель объекта с двусторонним обменом данными. В контексте промышленной безопасности (ПБ) использование ЦД позволяет безопасно тестировать сценарии отказов и планировать регламентные работы без остановки реального оборудования [1].

Модель позволяет «заглянуть» внутрь оборудования, увидеть износ деталей, появление коррозии или неравномерный нагрев стенок, не разбирая агрегат. Через интерфейс оператор может проиграть сценарии «что будет, если»: частичное засорение фильтра, скачок давления или отключение питания. Про-

грамма мгновенно рассчитывает последствия, показывает риск повреждения и предлагает оптимальное действие – снизить нагрузку, вывести линию в резерв, вызвать ремонтную бригаду.

Кроме мониторинга, цифровой двойник служит учебной площадкой. Новые сотрудники отрабатывают ручные операции в виртуальном цехе, что снижает вероятность ошибок на реальном оборудовании. Практика предприятий показывает, что использование такой модели ускоряет поиск дефектов, уменьшает число внеплановых остановок и экономит запасные части [2].

ПА базируется на методах машинного обучения, извлекающих закономерности из исторических и потоковых данных. В нефтехимии такие модели применяются для прогноза износа критически важных агрегатов и оптимизации технологических режимов [3].

Федеральный закон № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и международный стандарт ISO 45001 «Системы менеджмента охраны здоровья и безопасности труда – Требования и руководство по применению» задают рамки для внедрения цифровых технологий, акцентируя непрерывный мониторинг и снижение рисков [4].

В работе были систематизированы открытые источники — научные статьи, отраслевые отчёты и публикации компаний — о применении цифровых двойников и технологий прогнозирования отказов на нефтехимических предприятиях. Проведён обзор материалов о действующей системе промышленной безопасности АО «АНХК» и других компаний отрасли, а также сравнительный анализ практик внедрения цифровых двойников и прогнозной аналитики в компаниях Shell, «Татнефть» и Sinopet по таким критериям, как масштаб, цели и достигнутые эффекты. На основе передового опыта разработана концептуальная архитектура интеграции этих технологий.

Полученные в результате работы выводы основаны исключительно на открытых данных и литературных источниках.

Методика исследования включала пять последовательных этапов (рис. 1):

- 1) агрегирование релевантных публикаций и заводских регламентов в единую базу;
- 2) тематическое кодирование содержания с использованием частотного анализа ключевых слов;
- 3) построение матрицы «технология – эффект» для оценки распространённости и влияния практик;
- 4) ранжирование подходов по критериям применимости и достигнутого снижения риска (метод анализа иерархий);
- 5) визуализация результатов в виде диаграммы «затраты / сниженный риск».

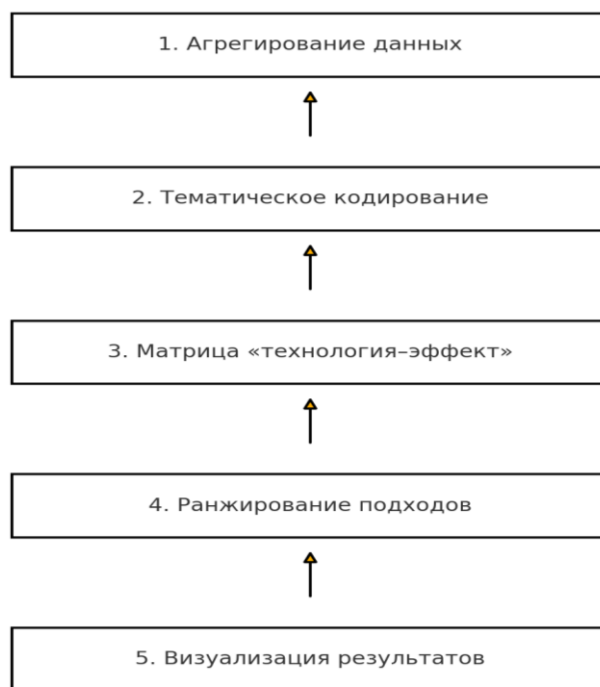


Рисунок 1 – Схема этапов аналитического цикла

Анализ 10 практик предупредительных мер в области ПБ нефтехимических компаний показал действие классического правила 80/20: пять ключевых мер ($\approx 20\%$ перечня) обеспечивают около 65% общего снижения риска инцидентов на предприятии (рис. 2).

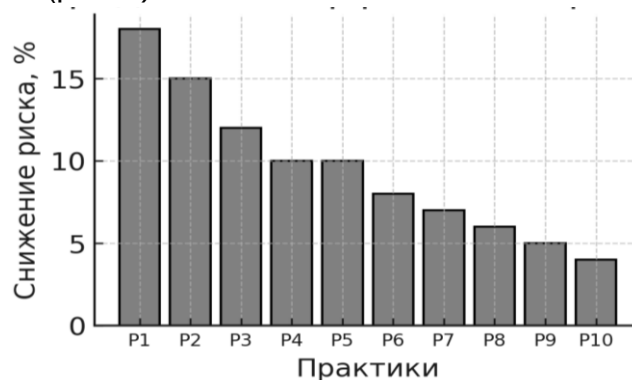


Рисунок 2 – Сводная диаграмма распределения практик предупредительных мер в области ПБ нефтехимических компаний:

P1 – цифровой двойник критически важного оборудования: используется для имитации поведения системы, позволяет прогнозировать отказы и тестировать аварийные сценарии без воздействия на реальные установки.

P2 – предиктивная вибродиагностика: анализирует колебания и вибрации оборудования для раннего выявления неисправностей, снижая риск аварий и продлевая срок службы агрегатов.

P3 – онлайн-контроль коррозии: система постоянного мониторинга состояния трубопроводов и сосудов под давлением, позволяет выявлять участки с повышенным риском разрушения.

P4 – ремонт по степени риска: обслуживание оборудования проводится не по графику, а в зависимости от реального уровня угроз, определённого аналитическими моделями.

P5 – VR/AR-тренажёры аварийных сценариев: персонал обучается действиям в экстремальных ситуациях в виртуальной среде, что повышает готовность и снижает влияние человеческого фактора.

P6 – автоматизированный учёт инцидентов: фиксация и классификация всех отклонений и происшествий в системе с последующим анализом и выводами для предупреждения повторений.

P7 – интеллектуальная система допуска к работам: проверка знаний и состояния сотрудников перед началом опасных операций с помощью цифровых платформ.

P8 – тепловизионный мониторинг: контроль за температурой оборудования и инфраструктуры для предупреждения перегрева и пожароопасных ситуаций.

P9 – контроль атмосферных выбросов в реальном времени: отслеживание концентрации вредных веществ для предотвращения превышений ПДК и оперативного реагирования.

P10 – интеграция ПБ-систем с ERP: объединение данных промышленной безопасности с корпоративными системами управления для комплексного анализа и принятия решений.

К таким мерам относятся запуск цифровых двойников критически важного оборудования; предсказательная вибродиагностика для раннего выявления опасного роста вибраций; онлайн-контроль коррозии трубопроводов и сосудов под давлением; ремонт по степени риска, где индикаторы безопасности автоматически определяют приоритеты обслуживания; VR/AR-тренажёры аварийных сценариев на базе цифрового двойника, снижающие влияние человеческого фактора. Внедрение этих пяти мер в первоочередном порядке обеспечивает максимальный эффект при минимальных затратах и формирует основу для дальнейшего проактивного управления промышленной безопасностью.

Анализ обзора литературных источников показал, что ведущие нефтехимические компании фокусируются на трёх стратегических направлениях: визуализация активов в режиме реального времени, прогноз технического состояния оборудования и интеграция данных ПБ с корпоративными системами планирования [5]. Ожидаемыми преимуществами являются снижение простоев и инцидентов, повышение прозрачности процессов и сокращение затрат на техническое обслуживание. При этом успешность зависит от зрелости ИТ-инфраструктуры и компетенций персонала.

Предлагаемая модель состоит из пяти слоёв: 1 – сбор данных IoT-датчиков, 2 – цифровой двойник объекта, 3 – модуль предиктивной аналитики, 4 – интерфейс визуализации и 5 – модуль управления рисками. Такое разбиение обеспечивает масштабируемость и возможность постепенного внедрения (рис. 3).



Рисунок 3 – Концептуальная архитектура модели.

Основные риски применения данной модели связаны с качеством исходных данных, кибербезопасностью и необходимостью изменения корпоративной культуры. Требуется разработка стандартов верификации цифровых моделей и типовых процедур защиты данных.

Интеграция технологий ЦД и ПА является перспективным направлением развития систем промышленной безопасности. Обзор показал, что данная технология уже демонстрирует значимый потенциал увеличения надёжности систем и снижения эксплуатационных расходов. Однако для ее широкого распространения необходимы дальнейшие исследования по стандартизации методик и экономической оценке проектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 57700.37 2021. «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» Текст: электронный – URL: <https://www.consultant.ru/document/> (дата обращения: 19.04.2025).
2. **Смирнов И.А.** Цифровые двойники как инструмент промышленной безопасности // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 4. – С. 15-22.
3. International Organization for Standardization. ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use. – Geneva: ISO, 2018. – 50 p.
4. Национальный стандарт ISO 45001 «Системы менеджмента охраны здоровья и безопасности труда – Требования и руководство по применению» –Текст: электронный – URL: <https://www.consultant.ru/document/> (дата обращения: 19.04.2025).
5. **Petrova L., Hernandez M.** Predictive maintenance benefits in oil and gas plants // Journal of Safety Engineering. – 2024. – Vol. 11, No. 2. – P. 78-85. – DOI 10.1234/jse.2024.11.2.78.