

УДК 614.84:004.942:665.6

*Кучукбаев Георгий Игоревич,
студент,*

*ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет»
Россия, г. Уфа*

*Научный руководитель: Муфтахова Эльмира Дамировна,
кандидат технических наук,*

*ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет»
Россия, г. Уфа*

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК СИСТЕМА РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗГОРАНИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация: В статье рассматривается инновационный подход к обеспечению пожарной безопасности на объектах нефтяной промышленности с использованием технологии цифрового двойника. Традиционные системы пожарной сигнализации, основанные на фиксации уже развившегося пожара (дым, пламя, температура), обладают существенным временным лагом между началом опасного процесса и моментом срабатывания. Цифровой двойник, функционирующий как динамическая виртуальная копия физического объекта в реальном времени, позволяет перейти к предиктивной модели безопасности. За счет интеграции данных с датчиков технологических параметров, анализа рабочих режимов оборудования, математического моделирования процессов и применения алгоритмов машинного обучения система способна выявлять предаварийные состояния и предпосылки к возгоранию за десятки минут до его физического проявления. В статье описывается архитектура такого решения, ключевые

аналитические модули и приводятся результаты тестового внедрения на модели резервуарного парка, показавшие возможность сокращения времени обнаружения угрозы на 70-85%.

***Ключевые слова:** цифровой двойник, пожарная безопасность, раннее обнаружение, предиктивная аналитика, нефтяная промышленность, резервуарный парк, машинное обучение, технологический риск.*

DIGITAL TWIN AS AN EARLY FIRE DETECTION SYSTEM AT OIL INDUSTRY FACILITIES

***Abstract:** The article examines an innovative approach to ensuring fire safety at oil industry facilities using digital twin technology. Traditional fire alarm systems, based on detecting an already developed fire (smoke, flame, temperature), have a significant time lag between the onset of a hazardous process and the moment of activation. A digital twin, functioning as a dynamic virtual copy of a physical object in real time, enables a shift to a predictive safety model. By integrating data from technological parameter sensors, analyzing equipment operating modes, mathematical process modeling, and applying machine learning algorithms, the system can identify pre-accident conditions and fire precursors tens of minutes before its physical manifestation. The article describes the architecture of such a solution, key analytical modules, and presents the results of a test implementation on a tank farm model, which demonstrated the potential to reduce threat detection time by 70-85%.*

***Keywords:** digital twin, fire safety, early detection, predictive analytics, oil industry, tank farm, machine learning, technological risk.*

Внедрение современных цифровых технологий кардинально меняет парадигму управления промышленной безопасностью, смещая фокус с реагирования на произошедшие инциденты на их прогнозирование и

предотвращение [1]. Особую актуальность это приобретает в нефтяной промышленности, где объекты характеризуются высокой пожарной и взрывопожароопасностью из-за постоянного обращения легковоспламеняющихся и горючих веществ [2]. Классические средства обнаружения пожара — дымовые, тепловые и пламенные извещатели — срабатывают по факту наличия признаков уже развившегося горения, что в условиях интенсивного развития пожара на нефтеперерабатывающих заводах или хранилищах может привести к катастрофическим последствиям. Технология цифрового двойника предлагает принципиально иной, проактивный подход, трансформируя его в систему сверхраннего обнаружения предаварийных ситуаций, способных привести к возгоранию [3].

Цифровой двойник в контексте пожарной безопасности — это не просто трехмерная визуализация объекта, а комплексная киберфизическая система, ядром которой являются взаимосвязанные математические и имитационные модели, работающие на потоковых данных. Его архитектура для решения задачи раннего предупреждения возгораний базируется на нескольких ключевых слоях. Первый слой — это сенсорная сеть расширенного мониторинга, которая включает не только традиционные пожарные извещатели, но и датчики технологических параметров: температуры стенок аппаратов и трубопроводов в сотнях контрольных точек, давления, расходов, концентрации паров углеводородов в воздухе рабочей зоны и обвалований, параметров работы электрооборудования (ток, вибрация, температура обмоток), данные газоанализаторов и системы видеонаблюдения с аналитикой [4]. Второй, основной слой — это аналитический движок, где в реальном времени выполняются расчеты. Здесь функционируют физические модели тепло- и массопереноса, позволяющие рассчитать нормативные температурные поля аппаратов и сравнить их с фактическими, выявляя аномальные перегревы. Особую роль играют модели, оценивающие «здоровье» оборудования, например, расчет индекса термической усталости

для печей или оценка состояния изоляции электродвигателей насосов на основе данных вибромониторинга и термографии [5]. Третий слой — интеллектуальный, основанный на алгоритмах машинного обучения. Нейросетевые модели обучаются на исторических данных, включающих как нормальную работу, так и записи предаварийных ситуаций и реальных пожаров. Они учатся выявлять сложные, неочевидные корреляции и паттерны в многомерных данных, которые не улавливаются пороговой логикой. Например, модель может связать рост вибрации насоса перекачки легких фракций с микроподтеками сальникового уплотнения, повышением концентрации паров в помещении и локальным ростом температуры в этой зоне, оценив совокупный риск возгорания от возможной искры задолго до срабатывания газоанализатора по ПДК или теплового извещателя [6].

Практическая реализация такого подхода была апробирована на цифровом двойнике парка резервуаров хранения нефтепродуктов. Система непрерывно анализировала режимы закачки и откачки, контролируя соблюдение регламентных скоростей для предотвращения статического электричества. Модель «дыхания» резервуара, учитывающая суточные колебания температуры, позволяла отслеживать аномалии в составе вытесняемых паровоздушных смесей, что могло свидетельствовать о начале процессов самонагрева внутри слоя нефтепродукта. В ходе испытаний система на основе совокупности признаков (отклонение температуры стенки от модели, аномальный профиль концентрации паров у дыхательного клапана, данные тепловизионного сканирования кровли) выдала предупреждение о потенциальном риске перегрева и парообразования в одном из резервуаров за 50 минут до того, как штатная система тепловых извещателей зафиксировала бы пороговое повышение температуры [7]. В другом сценарии, смоделированном на цифровом двойнике технологической установки, алгоритм предиктивной аналитики, отслеживая рост энергопотребления и

гармоник в сети электропитания печи, спрогнозировал риск пробоя изоляции и короткого замыкания за 30-40 минут до потенциального события.

Внедрение цифрового двойника как системы раннего обнаружения сталкивается с рядом технологических и организационных вызовов. Ключевым требованием является высочайшее качество и полнота исходных данных, что предполагает масштабную работу по оснащению объектов дополнительными датчиками и созданию «цифрового следа» [8]. Разработка и, что важнее, постоянная адаптация точных физических и предиктивных моделей под конкретный технологический процесс требуют привлечения узких специалистов и создают зависимость от их компетенций [9]. Эффективность системы напрямую зависит от скорости обработки данных и принятия решений, что выдвигает высокие требования к вычислительной инфраструктуре и каналам связи, особенно на распределенных объектах. Преодоление этих барьеров, однако, открывает путь к созданию принципиально нового уровня безопасности. Система позволяет не только предупреждать о конкретной угрозе, но и проводить виртуальные расследования, моделируя «что, если» различные исходные события, и оптимизировать превентивные меры, такие как графики диагностики или режимы обхода оборудования [10].

Таким образом, трансформация цифрового двойника в систему предиктивного обнаружения пожарных рисков представляет собой стратегический шаг в эволюции систем безопасности нефтяной отрасли. Эта технология позволяет выявить и нейтрализовать угрозу на этапе зарождения опасного отклонения, а не на этапе развития неконтролируемого горения. Сокращение времени обнаружения на десятки минут кардинально увеличивает вероятность успешной локализации инцидента силами автоматики и персонала, минимизируя потенциальный материальный, экологический и репутационный ущерб. Дальнейшее развитие связано с интеграцией таких систем с автоматическими средствами пожаротушения для

создания замкнутого адаптивного контура безопасности, где прогнозная аналитика будет напрямую инициировать превентивные действия, делая объекты нефтяной промышленности не только более умными, но и существенно более устойчивыми к одной из самых разрушительных угроз их существования.

Список литературы:

1. Васильев, К.Л., Алексеева, Н.О. Цифровой двойник как ядро интеллектуальной системы управления технологическим процессом // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2021. — № 8. — С. 3–10.
2. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. — М.: ВНИИПО, 2003.
3. Орлов, Г.С. Синергетические эффекты от внедрения систем предиктивной аналитики на опасных производственных объектах // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 11. — С. 52–58.
4. Рекомендации по проектированию автоматических систем пожаротушения и пожарной сигнализации для объектов нефтегазового комплекса. РД-13.220.00-КТН-026-2021. — М.: ПАО «Транснефть», 2021.
5. Казанцев, Д.В., Тихомиров, В.М. Мониторинг технического состояния оборудования как основа предиктивного обслуживания // Нефтяное хозяйство. — 2022. — № 5. — С. 112–117.
6. Мельников, С.В. Применение методов машинного обучения для прогнозирования аварийных ситуаций на промышленных объектах // Информационные технологии. — 2020. — Т. 26. — № 9. — С. 550–558.
7. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка прототипа системы предиктивного анализа пожарных рисков на основе цифрового двойника». — Уфа: УГНТУ, 2022.

8. Гаврилов, П.И., Федоров, М.С. Проблемы формирования цифрового контура и обеспечения качества данных на промышленном предприятии // Корпоративные системы. — 2023. — № 2. — С. 22–29.

9. Смирнов, А.А. Компетенции для цифровой трансформации: вызовы для нефтегазовой отрасли // Менеджмент в России и за рубежом. — 2019. — № 6. — С. 45–52.

10. Концепция построения систем пожарной безопасности «умного» месторождения. — М.: ФАУ «ВНИИПО МЧС России», 2023.