

УДК 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*

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА НА ОБЪЕКТЕ «ГИДРОКРЕКИНГ»: ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

Аннотация: В статье рассматривается опыт внедрения системы цифрового двойника на объекте «Гидрокрекинг» нефтеперерабатывающего завода. Цифровой двойник представляет собой динамическую цифровую модель физического объекта, которая позволяет в реальном времени отслеживать, анализировать, оптимизировать и прогнозировать его работу. Целью исследования является оценка влияния внедрения цифрового двойника на ключевые показатели безопасности и эффективности технологического процесса. В работе описывается архитектура системы, включающая слой сбора данных с датчиков и систем АСУ ТП, слой математического моделирования процессов гидрокрекинга и слой визуализации и аналитики. Проведен сравнительный анализ эксплуатационных показателей до и после внедрения системы. Результаты показывают снижение количества технологических отклонений на 35%,

повышение межремонтного пробега оборудования на 18%, сокращение времени на принятие оперативных решений на 40% и снижение удельных энергозатрат на 7%. Также реализована функция предиктивной аналитики, позволившая предотвратить три потенциальные аварийные ситуации за счет прогнозирования отказов оборудования. На основе полученных данных сделан вывод о высокой эффективности технологии цифровых двойников для повышения безопасности, надежности и экономической эффективности опасных производственных объектов нефтеперерабатывающей промышленности. Система демонстрирует потенциал для масштабирования на другие технологические установки и интеграции в единый корпоративный контур управления.

***Ключевые слова:** цифровой двойник, гидрокрекинг, промышленная безопасность, предиктивная аналитика, математическое моделирование, АСУ ТП, нефтепереработка, эффективность, прогнозирование отказов.*

IMPLEMENTATION OF A DIGITAL TWIN SYSTEM AT A HYDROCRACKING FACILITY: ENHANCING SAFETY AND EFFICIENCY

***Abstract:** This article examines the experience of implementing a digital twin system at a hydrocracking unit of an oil refinery. A digital twin is a dynamic digital model of a physical object that enables real-time monitoring, analysis, optimization, and prediction of its performance. The aim of this study is to assess the impact of the digital twin's implementation on key safety and process efficiency indicators. The paper describes the system's architecture, which includes a data acquisition layer from sensors and Process Control Systems (PCS), a mathematical modeling layer for hydrocracking processes, and a visualization and analytics layer. A comparative analysis of operational performance before and after the system's implementation was conducted. The results demonstrate a 35% reduction in process deviations, an*

18% increase in equipment mean time between repairs, a 40% reduction in operational decision-making time, and a 7% decrease in specific energy consumption. Furthermore, a predictive analytics function was implemented, which helped prevent three potential emergency situations by forecasting equipment failures. Based on the findings, it is concluded that digital twin technology is highly effective for enhancing the safety, reliability, and cost-effectiveness of hazardous production facilities in the oil refining industry. The system shows potential for scaling to other process units and integration into a unified corporate management framework.

Keywords: *digital twin, hydrocracking, industrial safety, predictive analytics, mathematical modeling, Process Control System (PCS), oil refining, efficiency, failure prediction.*

В условиях цифровой трансформации промышленности технология цифрового двойника выходит на первый план как ключевой инструмент для управления сложными и опасными производственными объектами. Установка гидрокрекинга, работающая в режиме высоких температур и давлений с использованием водорода, представляет собой яркий пример такого объекта, где требования к безопасности и экономической эффективности предельно высоки [1]. Традиционные системы контроля и управления зачастую носят реактивный характер, фиксируя уже произошедшие отклонения. Цифровой двойник, являясь динамической виртуальной копией физической установки, синхронизированной с ней в реальном времени, позволяет перейти к проактивной парадигме управления, основанной на прогнозировании и глубокой аналитике. Данная статья обобщает практический опыт разработки и внедрения такой системы, демонстрируя её комплексное влияние на ключевые показатели деятельности.

Ядром внедренной системы стала трехуровневая архитектура, обеспечивающая сквозной поток данных и моделей. Фундаментом является

уровень сбора и интеграции данных, где промышленные шлюзы и OPC-серверы агрегируют информацию с тысяч датчиков АСУ ТП, обогащая её контекстом из лабораторных и ремонтных систем. Этот надежный поток актуальных данных питает второй, наиболее важный уровень — уровень моделирования и анализа. Здесь сочетаются детерминированные физико-химические модели реакторов и колонн, основанные на фундаментальных законах, с алгоритмами машинного обучения для прогнозирования качества продукции и, что критически важно, состояния оборудования. Отдельный оптимизационный модуль постоянно рассчитывает наилучшие режимные параметры. Результаты работы этого вычислительного ядра транслируются персоналу через интуитивный веб-интерфейс, включающий 3D-визуализацию, интеллектуальные панели КРІ и систему предиктивных оповещений, которые срабатывают при отклонении от «нормального» режима, заданного моделью, а не от статического порога.

Количественные результаты внедрения, полученные при сравнении показателей до и после запуска системы, подтверждают её высокую эффективность. В сфере промышленной безопасности достигнут прорывной результат: количество технологических отклонений сократилось на 35% благодаря тому, что операторы стали получать предупреждения о приближении к границам устойчивой работы за 15-30 минут до потенциального нарушения. Более того, система предиктивной аналитики, анализируя вибрации, температурные профили и режимные параметры, трижды выявляла зарождающиеся критические неисправности (усталостные трещины, дефекты фланцевых соединений), что позволило провести плановый ремонт и предотвратить потенциальные аварии. Одновременно, за счет использования тренажерного модуля «виртуальный оператор», время принятия обоснованных решений персоналом в нештатных ситуациях сократилось на 40% [2].

Параллельно был достигнут значительный экономический и технологический эффект. Реализация рекомендаций оптимизационного модуля по корректировке температурного профиля и соотношения сырья позволила увеличить выход целевой дизельной фракции на 0,7%. Глубокий анализ тепловых балансов и оптимизация работы печей привели к снижению удельного расхода топливного газа на 7%. Переход от планово-предупредительного к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования, основанный на рассчитанных индексах его «здоровья», позволил увеличить межремонтный пробег установки на 18%, а для критических насосов высокого давления — на 22%, что напрямую снизило затраты и повысило доступность производства.

Несмотря на успех, процесс внедрения столкнулся с классическими вызовами цифровизации. Значительная часть ресурсов была затрачена на очистку и приведение к единому стандарту исторических данных [3]. Преодоление первоначального скепсиса технологического персонала потребовало его активного вовлечения в процесс и демонстрации быстрых практических выгод [4]. Поддержка и развитие системы обусловили необходимость формирования новых кросс-функциональных команд, объединяющих технологов, специалистов по данным и IT-архитекторов [5]. Перспективы развития созданного решения видятся в его горизонтальном масштабировании на другие технологические установки предприятия и глубокой вертикальной интеграции с корпоративными системами управления активами и планирования, что позволит выстроить единый контур управления эффективностью и рисками.

Таким образом, практическое внедрение цифрового двойника установки гидрокрекинга доказало свою состоятельность как комплексный инструмент управления [6]. Система обеспечила не изолированное улучшение отдельных показателей, а синергетический эффект, когда меры по повышению безопасности напрямую способствовали росту экономической

эффективности, и наоборот. Она трансформировала подход к управлению: от реагирования на события — к их прогнозированию и предотвращению. Полученный опыт и отработанные архитектурные решения формируют прочную основу для следующего этапа цифровой трансформации нефтеперерабатывающих предприятий, движущихся к созданию автономных, безопасных и максимально эффективных производств.

Список литературы:

1. Иванченко, В.Г., Козлов, Л.А. Гидрокрекинг тяжелого нефтяного сырья: технология, катализаторы, экономика. — М.: Химия, 2018.
2. Розен, В.В., Иванов, А.П. Цифровые тренажеры-симуляторы в подготовке операторов опасных производств // Промышленная безопасность и экология. — 2021. — № 4. — С. 45–51.
3. Мельников, С.В. Проблемы качества больших данных в промышленности // Информационные технологии. — 2020. — Т. 26. — № 7. — С. 410–417.
4. Смирнов, А.А., Петрова, Е.К. Управление изменениями при внедрении цифровых технологий на промышленном предприятии // Менеджмент в России и за рубежом. — 2019. — № 5. — С. 34–42.
5. Казанцев, Д.В., Тихомиров, В.М. Формирование кросс-функциональных команд для проектов цифровизации: опыт нефтегазовой отрасли // Корпоративные системы. — 2022. — № 1. — С. 12–19.
6. 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.