

Синергия машинного обучения и численного моделирования в цифровых двойниках: новые возможности для диагностики нефтегазового оборудования

Научный руководитель – Иванов Вадим Андреевич

Белов Дмитрий Александрович

Аспирант

Тюменский индустриальный университет, Нефтегазовый институт, Тюмень, Россия

E-mail: bda_2001@mail.ru

Цифровые двойники стали инструментом управления жизненным циклом нефтегазового оборудования. Их развитие долго сдерживалось противоречием: численные модели (CFD, МКЭ) точны, но медленны, а машинное обучение быстро, но требует данных и не всегда интерпретируемо. Решение этой дилеммы – в синергии подходов, позволяющей создавать гибридные модели, сочетающие достоинства обоих методов.

Эволюция цифровых двойников прошла четыре этапа: от статических 3D-моделей через интегрированные и автоадаптирующиеся к гибридным интеллектуальным, где присутствуют еще алгоритмы ML (рис.1). Это открывает новые возможности для диагностики.

Архитектура гибридного двойника (рис. 2) включает физический объект с датчиками, блок сбора данных, численную модель и модель ML. Их двусторонний обмен ускоряет расчёты и сохраняет физическую достоверность. Результаты поступают в модуль диагностики, выдающий рекомендации. Обратная связь замыкает контур управления.

В ходе исследования преодолены ограничения, указанные в работах [1, 2]: предложены алгоритмы очистки неоднородных данных и адаптации модели к переменным условиям эксплуатации.

Практическая ценность такого подхода особенно заметна при диагностике. Традиционные системы сигнализируют об уже свершившемся отказе. Гибридный же двойник способен выявлять аномалии на ранней стадии: например, по изменению вибрационной картины или термодинамических параметров он может предсказать износ подшипника за недели до аварии. Реализовано решение обратной задачи – по расхождению модели и реальных данных локализован скрытый дефект. Применение разработанной гибридной архитектуры для диагностики основных объектов нефтегазохимического производства: резервуаров, насосов, теплообменников, емкостей, трубопроводов и конденсаторопроводов (рис.3).

Внедрение даст экономические эффекты: сокращение простоев за счёт точного планирования ремонтов, повышение готовности оборудования корректировкой режимов, накопление данных для безопасного проектирования.

Таким образом, синергия машинного обучения и численного моделирования выводит диагностику на новый уровень. Разработанный гибридный цифровой двойник не просто отражает текущее состояние, а позволяет заглянуть в будущее: предупредить отказ и оптимизировать режимы работы.

Источники и литература

- 1) Ткаченко Е.А., Мейксина Е.М., Дорошенко С.Н. Интеграция цифровых технологий в нефтегазовую отрасль: детерминанты трансформации, системные эффекты и ограничения внедрения // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2025. № 6 (156). С. 110-117.
- 2) Белов Д.А., Иванов В.А., Земенкова М.Ю. Цифровизация при контроле технического состояния резервуаров для нефтепродуктов в системе обеспечения промышленной безопасности // Тюменский научный журнал. 2025. № 4. С. 32-37.

Иллюстрации

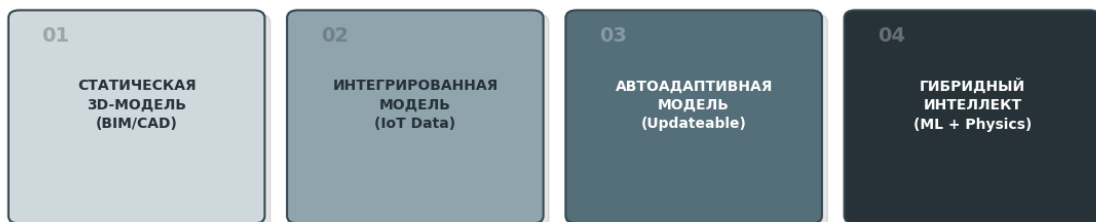


Рис. : 1. Эволюция цифровых двойников: от статических моделей к гибридным интеллектуальным системам

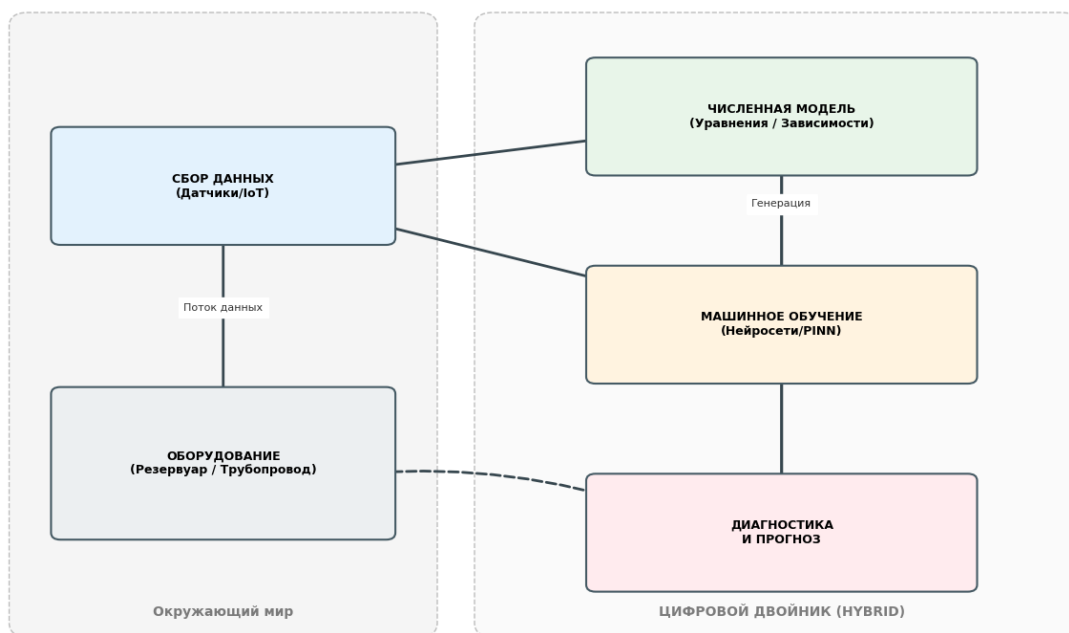


Рис. : 2. Архитектура гибридного цифрового двойника для диагностики оборудования

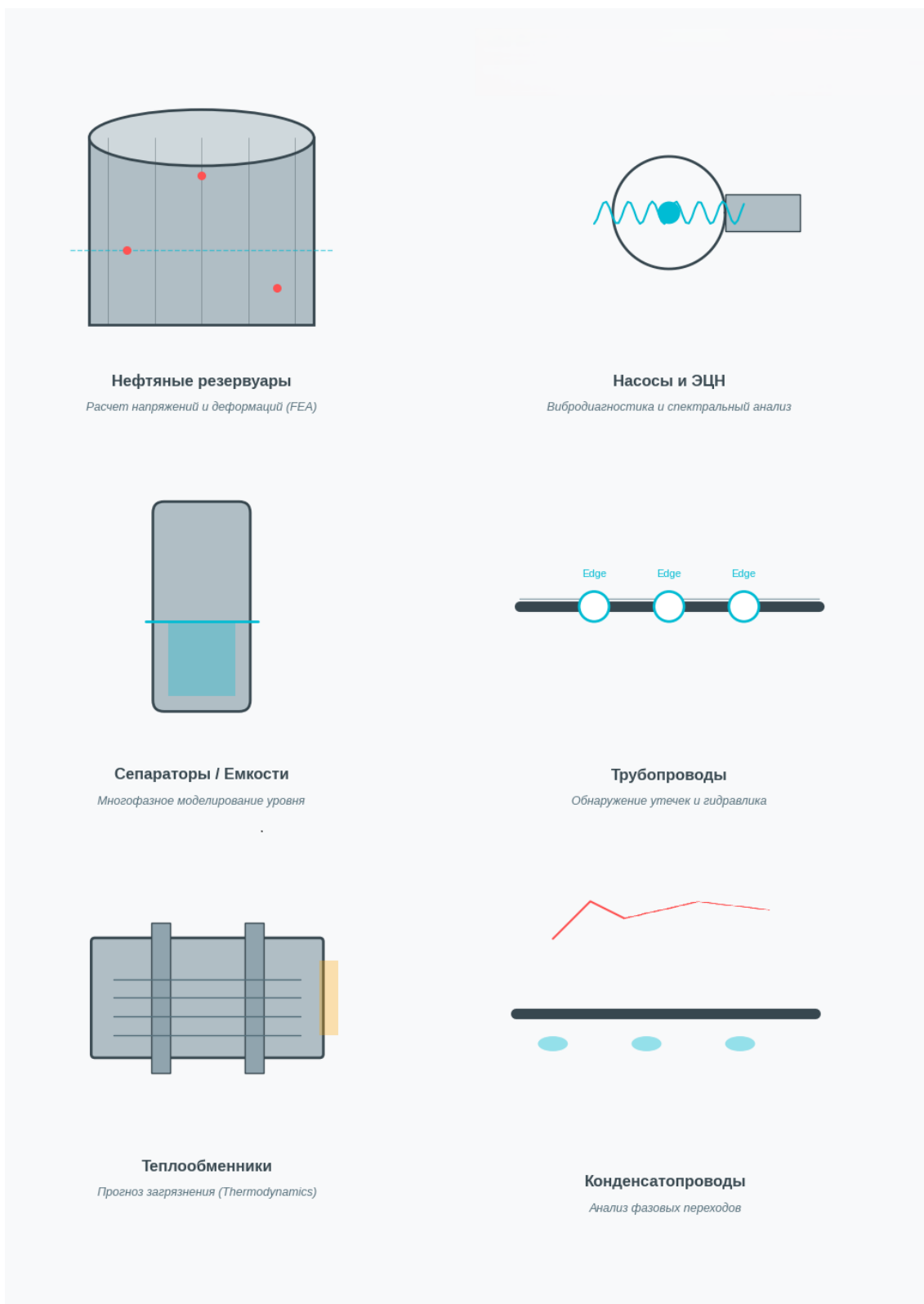


Рис. : 3. Применение гибридной архитектуры Edge + Cloud Computing для диагностики оборудования в нефтегазохимической промышленности