

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕСУРСА И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Резервуары вертикальные стальные (РВС) являются критически важными объектами в инфраструктуре нефтегазовой отрасли России, обеспечивая хранение значительных объемов углеводородов. Техническая безопасность РВС прямо влияет на экологические и промышленные риски. Традиционные методы оценки технического состояния, основанные на планово-предупредительных ремонтах и периодическом неразрушающем контроле (НК), отличаются высокой стоимостью, требуют длительного вывода оборудования из эксплуатации и не позволяют получить непрерывную картину деградации [1].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью перехода к предиктивному обслуживанию (PdM) на основе технологий Индустрии 4.0 – Интернета вещей (IoT), больших данных (Big Data) и искусственного интеллекта (ИИ). Целью статьи является анализ современного состояния и перспектив внедрения интеллектуальных методов для диагностики и оценки остаточного ресурса РВС, а также обзор пилотных проектов и программных решений, применяемых в Российской Федерации [2].

Интеллектуальный подход представляет собой не замену, а качественное усиление традиционных методов НК за счет применения алгоритмов машинного обучения (МО) для интерпретации и прогнозирования.

Современный тренд – цифровизация мониторинга резервуаров. Классические SCADA-системы продолжают использоваться для сбора данных с уровнемеров и датчиков на НПЗ и нефтебазах, обеспечивая автоматизацию учёта объёмов. Однако сегодня всё больше внедряются легковесные IIoT-системы: беспроводные сенсоры на базе LoRaWAN, NB-IoT и 4G/5G-связи, обеспечивающие удалённый и непрерывный мониторинг параметров резервуаров.

Интеллектуальный контроль основан на обработке данных, полученных с датчиков и систем НК. Выбор метода зависит от типа дефекта и целей мониторинга (таблица 1).

Представленные интеллектуальные методы кардинально усиливают традиционную диагностику за счет автоматизации анализа данных и прогнозирования. В отличие от разрозненных замеров, они обеспечивают непрерывный или высокочастотный мониторинг ключевых процессов деградации.

Таблица 1 – Сравнение типов интеллектуальных методов диагностики [2-5]

№	Метод	Характеристика	
1.	Акустическая эмиссия (АЭ)	Физический принцип	Регистрация упругих волн от растущих дефектов
		Алгоритмы ИИ/МО	CNN, DBSCAN, Random Forest
		Ключевые преимущества	– Точность классификации дефектов: до 92-95% после обучения на размеченных данных. – Раннее предупреждение: обнаружение активной коррозии под напряжением на 40-60% раньше, чем визуальные методы
		Ограничения	Высокая стоимость оборудования, сложность отделения полезного сигнала от технологических шумов
2.	Геодезический контроль (лазерное сканирование)	Физический принцип	Построение 3D-модели (облака точек)
		Алгоритмы ИИ/МО	Метод наименьших квадратов, регрессионный анализ
		Ключевые преимущества	– Точность измерений: $\pm 1-3$ мм для крупных объектов – Экономия времени: сокращение времени обследования на 70% по сравнению с традиционной тахеометрией
		Ограничения	Проводится периодически, а не непрерывно. Чувствительность к условиям среды
3.	Обработка УЗК-данных (ультразвуковой контроль)	Физический принцип	Измерение толщины стенки ультразвуком
		Алгоритмы ИИ/МО	K-Means, Матричное разложение, U-Net (для сегментации)
		Ключевые преимущества	– Автоматизация: обработка до 50 000 точек измерения за одну смену. – Прогноз коррозии: LSTM-модели прогнозируют остаточную толщину с ошибкой менее 5% на горизонте 2-3 года
		Ограничения	Требует доступа к поверхности, качество данных зависит от оператора
4.	Анализ временных рядов (IoT)	Физический принцип	Регистрация T, уровня, давления, вибрации
		Алгоритмы ИИ/МО	LSTM, ARIMA, Prophet, Ансамбли деревьев
		Ключевые преимущества	– Прогноз аномалий: снижение количества внеплановых остановок на 25-35%. – Оптимизация ресурса: увеличение межремонтного интервала на 15-20% за счет предиктивной модели
		Ограничения	Требует установки большого парка датчиков и надежной связи

Акустическая эмиссия в реальном времени отслеживает активность растущих дефектов. УЗК-анализ выявляет и прогнозирует развитие коррозии по тысячам точек. Геодезический контроль с высочайшей точностью фиксирует деформации, а анализ временных рядов выявляет аномальные и изнашивающие режимы эксплуатации.

Ключевое преимущество – переход от констатации текущего состояния к прогнозу остаточного ресурса. Алгоритмы ИИ (LSTM, CNN, кластеризация) не просто обрабатывают данные, а выявляют скрытые закономерности, позволяя предсказать, когда параметры выйдут за допустимые пределы. Это позволяет перейти от планово-предупредительного ремонта к предиктивной модели, оптимизируя затраты и повышая безопасность [3].

Для РВС с известной историей деградации эффективно применение цепей Маркова. Эти модели позволяют на основе матрицы вероятностей перехода дефекта из одного состояния (например, «Допустимое») в другое («Критическое») прогнозировать время, когда вероятность достижения предельного состояния превысит допустимый риск (например, 5%). Это обеспечивает коррекцию нормативного срока службы с учетом фактической скорости деградации [4].

Интегральная сравнительная оценка интеллектуальных методов диагностики резервуаров на основе экспертного балльного анализа представлена в виде диаграммы на рисунке 1.

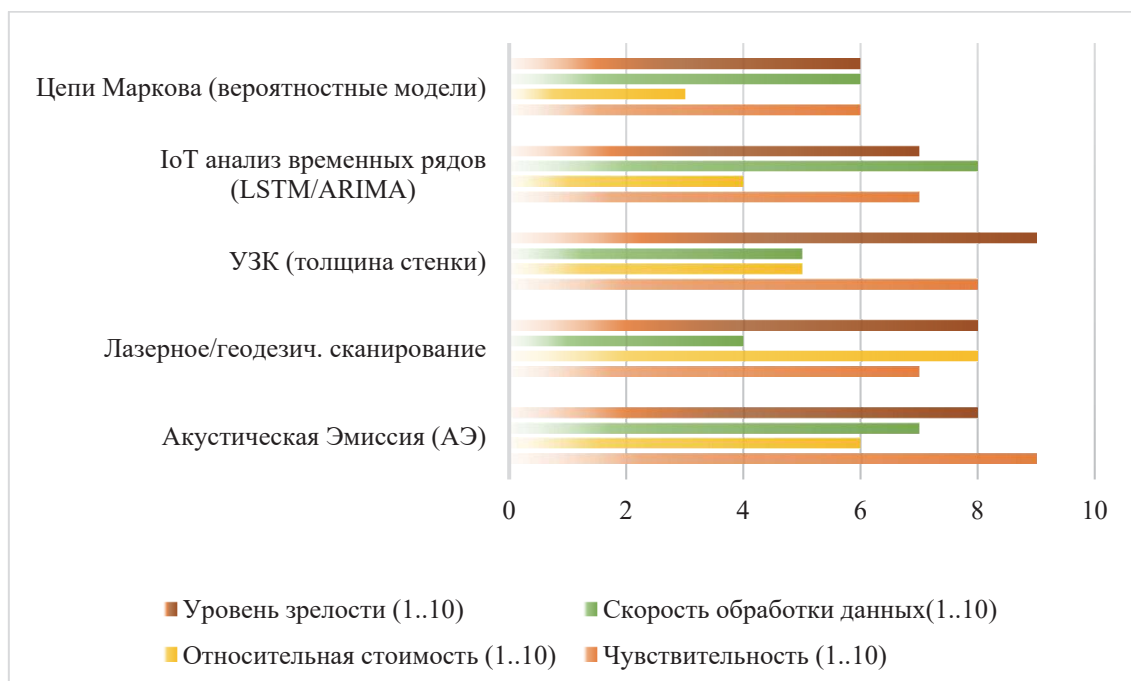


Рисунок 1 – Интегральная сравнительная оценка интеллектуальных методов диагностики резервуаров по экспертной шкале

К каждому методу присвоены оценки от 1 до 10 по четырем критериям. Такой подход позволяет визуализировать комплексное сравнение методов и определить их относительную эффективность при цифровизации диагностики РВС. Так, интеллектуальные методы мониторинга и диагностики резервуаров обеспечивают не только повышение надежности и безопасности, но и экономическую эффективность, а также соответствие трендам цифровизации нефтехимического сектора России.

Важным направлением исследований является верификация интеллектуальных методов на основе системного мониторинга показателей надежности. Адаптация нейросетевых подходов [2,5] для резервуарных парков позволяет создать унифицированную систему оценки ресурса. Особую перспективу приобретает разработка гибридных моделей, сочетающих физические законы деградации с машинным обучением, что особенно востребовано для российской нефтегазовой отрасли в условиях перехода к предиктивному обслуживанию.

Главным вызовом остается формирование единой нормативной базы, признающей результаты прогнозирования ИИ в качестве достаточного основания для принятия решений о продлении срока эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданев О. В. Перспективы технологий индустрии 4.0 в ТЭК России / О. В. Жданев, В. С. Чубоксаров // Энергетическая политика. – 2020. – №. 7 (149). – С. 16-33.
2. Земенкова М. Ю. Интеллектуальный мониторинг состояний объектов трубопроводного транспорта углеводородов с применением нейросетевых технологий / М. Ю. Земенкова, Е. Л. Чижевская, Ю. Д. Земенков. // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 933-944.
3. Гизуллин В. И., Жданов Р. А. Диагностирование технического состояния резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов / В. И. Гизуллин, Р. А. Жданов // Инновации и инвестиции. – 2020. – №. 12. – С. 112-114.
4. Feng Y. Corrosion analysis and remaining useful life prediction for storage tank bottom / Y. Feng, Y. Yang, B. Huang // International Journal of Advanced Ro-botic Systems. – 2019. – Т. 16. – №. 5. – Р. 1-9
5. Земенкова М. Ю. Системный мониторинг показателей надежности объектов трубопроводного транспорта : 05.13.01 : дис. ... канд. техн. наук / М. Ю. Земенкова ; ТИУ. – Тюмень, 2007. – 187 с.