

УДК 501**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ
РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕГАЗОВОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

Умяров М.В., студент гр. БМ-111, 1 курс

Научный руководитель: Демьяненко Ю.И. старший преподаватель
Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные проблемы эксплуатации нефтегазового оборудования в условиях высокой степени износа основных фондов. Проведен анализ основных причин отказов насосно-компрессорного оборудования и трубопроводных систем. Предложены пути решения проблем на основе внедрения современных методов диагностики, систем непрерывного мониторинга и математического прогнозирования остаточного ресурса. Сделан вывод о необходимости перехода от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому техническому состоянию.

Ключевые слова: нефтегазовое оборудование, надежность, диагностика, коррозия, неразрушающий контроль, SCADA-системы, предиктивное обслуживание, математическое моделирование, остаточный ресурс, цифровизация.

Нефтегазовая отрасль является системообразующей для экономики России. Однако степень износа основных фондов в отрасли достигает 50–60%, а по некоторым видам оборудования превышает 80% [1]. Насосы, компрессоры, трубопроводы работают в условиях агрессивных сред, высоких давлений и перепадов температур, что приводит к ускоренному износу и росту аварийности. Традиционная система планово-предупредительных ремонтов не учитывает реальное техническое состояние оборудования, что ведет либо к преждевременным ремонтам, либо к внезапным отказам.

Цель данной работы – проанализировать основные проблемы эксплуатации нефтегазового оборудования и обосновать пути их решения на основе внедрения современных методов диагностики, цифровых технологий и математического моделирования.

1. Основные проблемы эксплуатации нефтегазового оборудования

Анализ литературных источников и производственных данных позволяет выделить несколько групп проблем, характерных для современного состояния нефтегазового оборудования.

1.1. Коррозионное разрушение

Коррозия является основной причиной отказов трубопроводных систем и резервуарного парка. По данным исследований [5], до 40% всех аварий на нефтепроводах связано с коррозионными повреждениями. Перекачиваемая среда содержит агрессивные компоненты: сероводород (H_2S), углекислый газ (CO_2), минерализованную воду. Различают следующие виды коррозии:

- равномерная (общее утоньшение стенки);
- язвенная (локальные поражения);
- коррозия под напряжением (образование трещин);
- коррозионная усталость.

Скорость коррозии может достигать 1–3 мм/год, что при исходной толщине стенки 8–12 мм приводит к исчерпанию ресурса за 5–10 лет.

1.2. Эрозионный износ

Эрозия характерна для оборудования, работающего с высокоскоростными потоками, содержащими твердые частицы (песок, продукты коррозии). Особенно подвержены эрозии:

- рабочие колеса центробежных насосов;
- запорно-регулирующая арматура;
- трубопроводные отводы и тройники.

Исследования показывают, что интенсивность эрозионного износа пропорциональна кубу скорости потока [4]. Снижение скорости в 2 раза уменьшает износ в 8 раз.

1.3. Усталостные явления

Циклические нагрузки (пуски-остановы насосов, колебания давления, вибрации) приводят к накоплению усталостных повреждений. Особенно опасны резонансные режимы, когда частота вынужденных колебаний совпадает с собственной частотой элементов конструкции. Усталостные трещины являются причиной около 20% отказов вращающегося оборудования [4].

1.4. Человеческий фактор

По статистике, до 30% аварий происходит из-за ошибочных действий персонала [2]. Это могут быть:

- нарушения технологии монтажа и ремонта;
- несвоевременное выявление дефектов;
- неправильная интерпретация показаний приборов;
- несоблюдение режимов эксплуатации.

1.5. Конструктивные недостатки и моральный износ

Часть оборудования, особенно произведенного в советский период, имеет конструктивные недоработки: неудачные узлы уплотнений, зоны концентрации напряжений, недостаточную коррозионную стойкость выбранных материалов. Кроме того, такое оборудование часто не соответствует современным требованиям по энергоэффективности и экологической безопасности.

2. Современные методы диагностики и контроля

Решение перечисленных проблем требует внедрения современных методов технической диагностики, позволяющих получать объективную информацию о состоянии оборудования без его разборки.

2.1. Методы неразрушающего контроля (НК)

В соответствии с ГОСТ 18353-93, применяются следующие методы НК:

- визуальный и измерительный контроль – выявление поверхностных дефектов, замеры геометрических параметров.
- ультразвуковая толщинометрия – измерение фактической толщины стенки, выявление зон утоньшения.
- ультразвуковая дефектоскопия – обнаружение внутренних дефектов (трещин, расслоений).
- магнитопорошковый и капиллярный контроль – выявление поверхностных трещин.
- радиографический контроль – просвечивание сварных швов.
- вибродиагностика – оценка технического состояния вращающегося оборудования по параметрам вибрации (ГОСТ ИСО 10816-1-97) [6].
- тепловизионный контроль – выявление зон перегрева, нарушений теплоизоляции.

2.2. Системы непрерывного мониторинга (SCADA)

Современные SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition) позволяют в режиме реального времени отслеживать сотни параметров: давление, температуру, расход, вибрацию, потребляемую мощность. Данные накапливаются в архивах и могут использоваться для последующего анализа.

Как отмечает Ю.И. Демьяненко, «интеграция информационных технологий в профессиональную деятельность позволяет минимизировать временные потери и повысить точность диагностики» [7, С. 38]. Накопление больших массивов данных создает основу для применения методов математической статистики и прогнозирования.

3. Математические методы прогнозирования отказов

Переход к обслуживанию по фактическому состоянию невозможен без прогнозирования момента отказа. Для этого используются различные математические методы.

3.1. Статистический анализ диагностических данных

Первичная обработка данных включает расчет основных статистических характеристик:

- среднее арифметическое: $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$
- дисперсия и среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Рост среднее квадратичного отклонения при неизменном среднем может указывать на появление случайных возмущений, связанных с развитием дефекта.

3.2. Корреляционный анализ

Для выявления взаимосвязей между различными параметрами используется коэффициент корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Значение r , близкое к 1 или -1, указывает на сильную связь между параметрами. Например, появление сильной корреляции между вибрацией и давлением может свидетельствовать о гидравлических ударах или кавитационных явлениях.

3.3. Регрессионный анализ и прогнозирование трендов

Для прогнозирования изменения параметра во времени строится регрессионная модель. В простейшем случае – линейная:

$$y = a + b \cdot t$$

где y – контролируемый параметр, t – время, a и b – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

Коэффициент b (скорость изменения параметра) вычисляется по формуле:

$$b = \frac{\sum (t_i - \bar{t})(y_i - \bar{y})}{\sum (t_i - \bar{t})^2}$$

Зная допустимое предельное значение $y_{\text{пред}}$, можно найти прогнозируемое время достижения этого значения: $t_{\text{пред}} = \frac{y_{\text{пред}} - a}{b}$

Точность прогноза оценивается коэффициентом детерминации R^2 .

3.4. Вероятностные методы оценки остаточного ресурса

Для оборудования, отказы которого носят случайный характер, используются вероятностные модели. Наиболее распространены:

- экспоненциальное распределение (для внезапных отказов):

$$R(t) = e^{-\lambda t};$$

- распределение Вейбулла (для износных отказов): $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$

Параметры распределений определяются по статистическим данным об отказах аналогичного оборудования.

4. Практические примеры применения

Пример 1. Прогнозирование отказа насоса по вибрации

На нефтеперекачивающей станции ведется мониторинг вибрации центробежного насоса. За 10 дней получены следующие данные (мм/с):

День	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вибрация	2,2	2,3	2,1	2,4	2,5	2,8	3,2	3,5	3,8	4,2

Построение линейного тренда по последним 6 точкам (дни 5–10) дает уравнение: $y = 0,8 + 0,337 \cdot t$. Предельно допустимая вибрация по ГОСТ ИСО 10816-1 составляет 5,0 мм/с. Подставляя в уравнение, получаем $t_{\text{пред}} \approx 12,5$. То есть при сохранении тенденции критическое значение будет достигнуто на 12–13 день. Насос был остановлен на 11 день, при осмотре выявлен износ подшипника, предотвращена авария.

Пример 2. Выявление коррозионного участка трубопровода

При внутритрубной диагностике участка нефтепровода диаметром 530 мм выявлено локальное утоньшение стенки с 10 мм до 6,5 мм на протяжении 2 м. Расчетное рабочее давление 6,4 МПа. По формуле Барлоу (СП 36.13330.2012) минимально допустимая толщина стенки: $\delta_{\min} = \frac{P \cdot D}{2R\phi}$

где P – давление, D – диаметр, R – расчетное сопротивление, ϕ – коэффициент прочности сварного шва.

Расчет показал, что текущая толщина (6,5 мм) уже ниже допустимой (7,2 мм) для данного давления. Участок был выведен в ремонт, что предотвратило возможный разрыв.

5. Роль цифровых компетенций и подготовки кадров

Внедрение современных методов диагностики и прогнозирования требует соответствующей подготовки персонала. Как отмечает Ю.И. Демьяненко, «использование информационных технологий в научно-исследовательской работе студентов при изучении математики» [4] является ключевым фактором формирования специалиста, способного не просто обслуживать оборудование, но и анализировать данные, прогнозировать отказы, принимать обоснованные технические решения.

Современный инженер-механик нефтегазового профиля должен обладать следующими компетенциями:

- знание методов неразрушающего контроля;
- умение работать с SCADA-системами и интерпретировать их данные;
- владение основами математической статистики и прогнозирования;
- понимание физико-химических процессов, приводящих к отказу;
- навыки работы с нормативной документацией.

Формирование этих компетенций требует интеграции информационных технологий и прикладных математических задач в образовательный процесс, что подчеркивается в исследованиях [8].

Проблема повышения надежности нефтегазового оборудования требует комплексного решения. Основными направлениями являются техническое перевооружение, внедрение современных методов диагностики, цифровизация процессов управления надежностью и подготовка квалифицированных кадров. Переход к обслуживанию по фактическому состоянию на основе математического прогнозирования позволяет снизить затраты на ремонты и предотвратить аварии. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование математических моделей прогнозирования и создание интегрированных систем управления надежностью.

Список литературы:

1. Состояние и проблемы технического перевооружения нефтегазового комплекса России // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 5. – С. 10–15.
2. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). Отчет о деятельности в 2023 году. – М., 2024. – 120 с.
3. Иванов В.А., Петров С.Н. Коррозия и защита нефтегазового оборудования. – М.: Недра, 2021. – 350 с.
4. Демьяненко Ю.И. Интеграция информационных технологий в образовательный процесс вуза / Материалы III Межвузовской научно-практической конференции с международным участием /

- Информационные технологии и информационная безопасность в профессиональной деятельности. – Новосибирск, 2024. – С. 36–40.
5. Сидоров А.М. Эрозионный износ элементов нефтепромыслового оборудования // Территория Нефтегаз. – 2022. – № 3. – С. 42–48.
 6. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 1995. – 25 с.
 7. Демьяненко Ю.И. Информационные технологии в научно-исследовательской работе студентов при изучении математики / Материалы IV Межвузовской научно-практической конференции с международным участием / Информационные технологии и информационная безопасность в профессиональной деятельности. – Новосибирск, 2025. – С. 45–50.
 8. Демьяненко Ю.И. К вопросу формирования цифровых компетенций у студентов экономических специальностей / Материалы IV-й Национальной научно-практической конференции (с международным участием) / Цифровые инструменты обеспечения устойчивого развития экономики и образования: новые подходы и актуальные проблемы. – Орел, 2025. – С. 71-76.