

*Щинников Данила Александрович,  
Магистрант,  
Тюменский Индустриальный Университет*

## **СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ**

***Аннотация:** Установки электроцентробежных насосов составляют основу механизированного фонда нефтедобычи, а вопросы обеспечения их надежности напрямую определяют операционную эффективность предприятий. Разработка специализированного программного комплекса для диагностики и прогнозирования технического состояния УЭЦН позволяет существенно увеличить межремонтный период, сократить внеплановые простои и минимизировать потери добычи. В работе рассматриваются архитектура программного решения, интеграция методов машинного обучения и нейросетевого моделирования для анализа эксплуатационных параметров, а также практические аспекты внедрения системы поддержки принятия решений в условиях реальных месторождений. Предложены подходы к автоматизированному контролю технического состояния погружного оборудования на основе телеметрических данных, оценке остаточного ресурса компонентов и формированию адресных рекомендаций по режимам эксплуатации.*

***Ключевые слова:** установка электроцентробежного насоса, программный комплекс, надежность, диагностика, прогнозирование отказов, нейронные сети, мониторинг.*

## DEVELOPMENT OF A SOFTWARE COMPLEX FOR ENSURING THE RELIABILITY OF ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS

***Annotation:** Electric submersible pump installations form the backbone of mechanized oil production, and ensuring their reliability directly determines the operational efficiency of enterprises. Development of a specialized software complex for diagnostics and forecasting the technical condition of ESP allows significantly increasing the mean time between failures, reducing unplanned downtime, and minimizing production losses. The paper examines the architecture of the software solution, integration of machine learning methods and neural network modeling for analyzing operational parameters, as well as practical aspects of implementing a decision support system under real field conditions. Approaches to automated monitoring of downhole equipment technical condition based on telemetry data, assessment of component residual life, and formation of targeted recommendations for operating modes are proposed.*

***Keywords:** electric submersible pump installation, software complex, reliability, diagnostics, failure prediction, neural networks, monitoring.*

Проблемы обеспечения надежности установок погружного электрооборудования в нефтедобыче

Средняя наработка на отказ установок электроцентробежных насосов существенно варьируется как между нефтегазодобывающими предприятиями, так и между производителями оборудования – и это определяется прежде всего условиями эксплуатации. По данным статистического анализа за период с 2010 по 2022 год, межремонтный период фонда УЭЦН вырос с 646 до 918 суток, однако этот показатель все еще далек от технологического предела эксплуатации электроцентробежных насосов, который, согласно лучшим мировым практикам, составляет от пяти до десяти лет [1]. Таким образом, потенциал увеличения надежности не исчерпан.

Основные причины отказов УЭЦН распределяются неравномерно по узлам установки. Анализ эксплуатационных данных более семисот установок на месторождениях Западной Сибири показывает, что погружной электродвигатель совместно с кабельной линией отвечают за пятьдесят–шестьдесят процентов всех отказов [2]. При этом на долю непосредственно погружного электродвигателя приходится от двадцати пяти до тридцати пяти процентов, а на кабельную линию – от двадцати пяти до тридцати процентов отказов. Центробежный насос демонстрирует аварийность на уровне пятнадцати–двадцати пяти процентов от общего количества отказов. Узел гидрозащиты отвечает за шесть–двенадцать процентов неисправностей.

Эксплуатация УЭЦН в периодическом режиме оказывает негативное влияние на ресурс компонентов. Экспериментальные исследования погружных насосов и гидрозащит в условиях постоянного и периодического режимов эксплуатации подтверждают, что циклические нагрузки приводят к ускоренному износу узлов установки [2, с. 24]. Однако многие месторождения в стадии падающей добычи вынуждены переходить к прерывистым режимам – что делает задачу диагностики технического состояния оборудования еще более актуальной.

Внедрение автоматизированных систем мониторинга погружного оборудования позволяет выявлять отклонения от нормальных режимов работы на ранних стадиях – до того, как произойдет критический отказ. В условиях широкой территориальной рассредоточенности скважин и большого количества объектов контроля ручная диагностика оказывается малоэффективной и ресурсоемкой. По этой причине за последние годы активно развиваются предиктивные подходы, основанные на анализе телеметрических данных, статистических показателей и моделях машинного обучения [3].

Важнейшим условием повышения эффективности эксплуатации механизированного фонда является формирование полной картины

технического состояния оборудования в режиме реального времени. Это достигается за счет интеграции данных систем погружной телеметрии, станций управления, корректирующих параметров работы электроприводов, и историй предыдущих отказов. Такой комплексный подход требует разработки специализированного программного обеспечения, способного обрабатывать разнородные источники данных и предоставлять операторам адресные рекомендации по управлению режимами работы установок.

#### Архитектура и функциональность программного комплекса

Программный комплекс для обеспечения надежности УЭЦН строится на принципах модульности и интеграции различных источников данных. Типовая архитектура включает несколько взаимосвязанных компонентов:

- модуль сбора и предварительной обработки телеметрических данных;
- модуль хранения исторических данных по режимам функционирования установок;
- модуль диагностики технического состояния на основе нейросетевых алгоритмов;
- модуль прогнозирования отказов и оценки остаточного ресурса;
- модуль поддержки принятия решений с формированием рекомендаций для операторов;
- интерфейс визуализации данных и управления системой.

Основой для диагностики служит база данных, в которой хранятся исторические данные по режимам функционирования установок погружного оборудования – «норма», «неисправность» – и типам неисправностей, возникавших в ходе их работы: «снижение притока», «заклинивание УЭЦН», «снижение подачи», «слом вала» и другие [4, с. 103]. Каждое состояние характеризуется набором эксплуатационных параметров: давление на приеме насоса, температура обмотки погружного электродвигателя, значения тока и напряжения, частота вращения, вибрационные характеристики.

Модуль предварительной обработки данных выполняет фильтрацию аномальных значений, нормализацию параметров и расчет производных признаков. В частности, вычисляются скользящие средние, дисперсия показателей за временное окно, тренды изменения ключевых параметров. Это позволяет повысить устойчивость диагностических алгоритмов к случайным флуктуациям данных и шумам телеметрических систем.

Нейросетевые принципы обработки данных позволили наделять программный продукт высоким быстродействием при хорошем качестве классификации состояний погружного оборудования [4]. Используемые архитектуры нейронных сетей включают многослойные персептроны для задач классификации технических состояний, рекуррентные сети для анализа временных рядов параметров работы установок и ансамбли моделей для повышения надежности прогноза.

Впрочем, исключительная опора на нейросетевые методы не всегда оправдана – в ряде случаев более эффективными оказываются гибридные подходы, сочетающие экспертные правила с алгоритмами машинного обучения. Экспертная система оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе продукционного представления знаний и нечеткой логики позволяет формализовать опыт специалистов-эксплуатационников и интегрировать его в общий контур принятия решений [5]. Продукционные правила описывают связь между наблюдаемыми параметрами и диагнозами, а нечеткая логика обеспечивает учет неопределенности информации.

Важным элементом программного комплекса является модуль прогнозирования технического состояния УЭЦН при эксплуатации с оценкой динамических нагрузок [6]. Прогнозирование выполняется на основе нейросетевого моделирования временных рядов эксплуатационных параметров, что позволяет оценить вероятность возникновения различных типов неисправностей в заданном временном горизонте – от нескольких суток

до нескольких недель. Ранее подобные оценки формировались исключительно на основе средней наработки на отказ и не учитывали индивидуальные особенности конкретной скважины и установки.

Методы диагностики и прогнозирования отказов на основе машинного обучения

Применение методов машинного обучения для прогнозирования отказов УЭЦН получило активное развитие в последние годы. Целью таких исследований является обобщение опыта эксплуатации большого числа установок, выявление закономерностей в поведении оборудования перед отказом и автоматизация процессов диагностики [1].

Обнаружение неисправностей центробежных насосов и электродвигателей с использованием анализа сигнатур тока двигателя и автоматизированного машинного обучения продемонстрировало точность диагностики на уровне 89 процентов [7]. Усовершенствованное векторное преобразование Парка, примененное к исходным данным о токе и напряжении, выявляет даже малозаметные аномалии в работе насоса, усиливая возможности раннего прогнозирования сбоев. Важно отметить, что анализ сигнатур тока является неинвазивным и масштабируемым инструментом для мониторинга состояния оборудования – он не требует установки дополнительных датчиков в скважине и может быть реализован на уровне наземных станций управления.

Системный мониторинг установок электроцентробежных насосов в режиме эксплуатации предусматривает на выходе из системы пять технических состояний исследуемого объекта: норма, предотказное состояние, критическое состояние, отказ, неопределенное состояние [8]. Классификация на большее число состояний по сравнению с бинарной схемой «норма – отказ» позволяет более гибко управлять режимами эксплуатации и планировать профилактические мероприятия. предотказное состояние служит

индикатором необходимости скорректировать режим работы или провести диагностику узлов установки до наступления критического отказа.

Алгоритмы машинного обучения, используемые в системах диагностики УЭЦН, включают следующие типы моделей:

- деревья решений и случайные леса для классификации технических состояний по набору признаков;
- метод опорных векторов для разделения классов состояний в многомерном пространстве параметров;
- градиентный бустинг для построения ансамблей моделей с высокой точностью классификации;
- рекуррентные нейронные сети для анализа последовательностей значений параметров во времени;
- автоэнкодеры для выявления аномалий путем оценки отклонений от типичных режимов работы.

Каждый из подходов обладает своими преимуществами и областями применимости. Деревья решений хорошо интерпретируемы и позволяют выявить наиболее значимые параметры для диагностики, однако склонны к переобучению. Случайные леса и градиентный бустинг повышают устойчивость к переобучению за счет усреднения предсказаний нескольких моделей. Рекуррентные нейронные сети эффективны при работе с временными зависимостями, но требуют значительных объемов данных для обучения и существенных вычислительных ресурсов.

Проблема дисбаланса классов – когда случаи нормальной работы встречаются значительно чаще, чем отказы – решается за счет применения техник ресемплинга или назначения весов классам при обучении. Важным параметром оценки качества модели в таких условиях становится не общая точность, а метрики, учитывающие соотношение истинно положительных и ложноположительных предсказаний: precision, recall, F1-мера, площадь под ROC-кривой.

Практические аспекты внедрения и эксплуатации программных систем

Внедрение программного комплекса для обеспечения надежности УЭЦН на действующих месторождениях требует решения ряда организационно-технических задач. Первоочередная – это обеспечение непрерывного сбора данных с установок и их передача в централизованную систему обработки.

Системы погружной телеметрии в общем случае состоят из погружного блока и наземного блока согласования телеметрии. Погружной блок предназначен для измерения и передачи в блок согласования ряда параметров: давление, температура, вибрация [9]. Информация из погружного блока в наземный поступает по силовому кабелю. Впрочем, использование кабеля как среды передачи данных накладывает ограничения на объем передаваемой информации – в частности, высокочастотные данные вибрации требуют сжатия или предварительной обработки непосредственно в погружном блоке.

Интеграция программного комплекса с существующими автоматизированными системами управления технологическими процессами нижнего уровня позволяет получать данные о режимах работы электроприводов, частоте вращения, потребляемой мощности без установки дополнительных измерительных устройств [10]. Протоколы обмена данными – Modbus, OPC UA, MQTT – обеспечивают совместимость с оборудованием различных производителей.

Обучение нейронных сетей и других моделей машинного обучения выполняется на исторических данных, накопленных за предыдущие периоды эксплуатации. Качество обученной модели критически зависит от полноты и достоверности этих данных. В случае недостаточного объема данных применяются методы переноса обучения – когда модель, обученная на данных одного месторождения, дообучается на ограниченном наборе данных другого месторождения. Это позволяет сократить время и затраты на запуск системы на новых объектах.

Эксплуатация программного комплекса предполагает регулярную валидацию моделей и корректировку их параметров по мере накопления новых данных. Дрейф характеристик оборудования, изменение условий эксплуатации, замена компонентов установки – все это может приводить к снижению точности прогнозирования. По этой причине в систему встраиваются механизмы автоматического переобучения моделей при обнаружении значимого снижения качества классификации.

Интерфейс программного комплекса предоставляет оператору информацию о текущем техническом состоянии всех контролируемых установок, прогнозируемых сроках возможных отказов и рекомендациях по корректировке режимов работы. Визуализация данных включает графики изменения ключевых параметров во времени, тепловые карты показателей для группы скважин, индикаторы состояния оборудования. Диагностическая информация формируется в виде отчетов с указанием типа выявленной неисправности, вероятности ее развития и предлагаемых действий.

### **Заключение**

Разработка и внедрение программного комплекса по обеспечению надежности УЭЦН представляет собой комплексную задачу, требующую интеграции методов машинного обучения, экспертных систем и средств сбора и обработки телеметрических данных. Применение нейросетевых алгоритмов и других методов искусственного интеллекта позволяет автоматизировать процесс диагностики технического состояния погружного оборудования и прогнозировать отказы с высокой точностью. Системный подход к мониторингу установок электроцентробежных насосов в режиме эксплуатации обеспечивает своевременное выявление предотказных состояний и формирование адресных рекомендаций для операторов.

Практический опыт эксплуатации подобных систем на месторождениях Западной Сибири демонстрирует существенное увеличение межремонтного периода и снижение операционных затрат за счет предотвращения

внеплановых простоев. Гибридные подходы, сочетающие экспертные правила с алгоритмами машинного обучения, оказываются более эффективными по сравнению с использованием исключительно одного класса методов. Интеграция программного комплекса с автоматизированными системами управления технологическими процессами позволяет минимизировать затраты на установку дополнительных средств измерения и ускоряет внедрение на действующих объектах.

Дальнейшее развитие программных комплексов для обеспечения надежности УЭЦН связано с расширением применения методов глубокого обучения для анализа многомерных временных рядов, использованием технологий обработки больших данных для интеграции информации от тысяч установок и разработкой адаптивных алгоритмов переобучения моделей в условиях изменяющихся режимов эксплуатации. Внедрение систем предиктивной аналитики на основе искусственного интеллекта является перспективным направлением повышения операционной эффективности нефтедобывающих предприятий.

#### **Список литературы:**

1. Обзор опыта прогнозирования отказов УЭЦН методами машинного обучения // Нефть. Газ. Новации. 2024. № 2. С. 41–47. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/oborudovanie/875411-obzor-opyta-prognozirovaniya-otkazov-uetsn-metodami-mashinnogo-obucheniya/> (дата обращения: 10.05.2026).
2. Анализ надежности компонентов установки электроцентробежных насосов при различных режимах эксплуатации // ПроНефть. 2022. № 4. С. 18–26. URL: <https://proneft.elpub.ru/jour/article/download/10/10> (дата обращения: 10.05.2026).
3. Истомин Д.А., Столбов В.Ю., Платон Д.Н. Экспертная система оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на

основе производственного представления знаний и нечеткой логики // Автоматизация в промышленности. 2020. № 6. С. 34–41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekspertnaya-sistema-otsenki-tehnicheskogo-sostoyaniya-uzlov-elektrotsentrobezhnyh-nasosov-na-osnove-produktsionnogo-predstavleniya> (дата обращения: 10.05.2026).

4. Коровин Я.С. Особенности внедрения системы поддержки принятия решений по контролю состояния УЭЦН на основе нейронной сети: практические результаты, перспективы развития // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 8. С. 99–108. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-vnedreniya-sistemy-podderzhki-prinyatiya-resheniy-po-kontrolyu-sostoyaniya-uetsn-ustanovok-elektrotsentrobezhnyh-nasosov> (дата обращения: 10.05.2026).

5. Каракулов И.В., Ключев А.В., Столбов В.Ю. Прогнозирование технического состояния электроцентробежного насоса на основе нейросетевого моделирования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2018. № 3. С. 267–278. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-tehnicheskogo-sostoyaniya-elektrotsentrobezhnogo-nasosa-na-osnove-neyrosetevogo-modelirovaniya> (дата обращения: 10.05.2026).

6. Кузмин М.И., Вербицкий В.С., Хабибуллин Р.А. Анализ влияния эксплуатационных параметров и режимов работы добывающих скважин на надежность установок электроцентробежных насосов // Нефтяное хозяйство. 2024. № 12. С. 106–111. URL: [https://www.oil-industry.net/Journal/archive\\_detail.php?ID=11117&art=240081](https://www.oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=11117&art=240081) (дата обращения: 10.05.2026).

7. Халиков Р.Р., Чернецкий М.Ю., Ревин И.Е., Потемкин В.А. Обнаружение неисправностей центробежных насосов и электродвигателей с использованием анализа сигнатур тока двигателя и автоматизированного

машинного обучения // Вестник технологического университета. 2024. № 5. С. 78–85. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obnaruzhenie-neispravnostey-tsentrobeznyh-nasosov-i-elektrodvigateley-s-ispolzovaniem-analiza-signatur-toka-dvigatelya-i> (дата обращения: 10.05.2026).

8. Системный мониторинг установок электроцентробежных насосов в режиме эксплуатации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. № 2. С. 45–52. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-monitoring-ustanovok-elektrotsentrobeznyh-nasosov-v-rezhime-ekspluatatsii> (дата обращения: 10.05.2026).

9. Метод предварительной обработки данных вибрации в погружной части системы телеметрии // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2019. № 4. С. 112–119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-predvaritelnoy-obrabotki-dannyh-vibratsii-v-pogruzhnoy-chasti-sistemy-telemetry> (дата обращения: 10.05.2026).

10. О совершенствовании моделей АСУ ТП нижнего уровня УЭЦН в условиях перевода нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3. С. 56–63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-sovershenstvovanii-modeley-asu-tp-nizhnego-urovnya-uetsn-v-usloviyah-perevoda-neftyanyh-skvazhin-v-preryvistye-rezhimy> (дата обращения: 10.05.2026).