

На правах рукописи



ШЕСТАКОВА ЕВГЕНИЯ ВЛАДИМИРОВНА

**ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ «ВИНТОВОЙ ЗАБОЙНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – ФРЕЗЕРНЫЙ
ИНСТРУМЕНТ»**

Специальность 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы
(отрасль наук – технические)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2025

Работа выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Ямалиев Виль Узбекович

Официальные оппоненты: **Симонянц Сергей Липаритович**
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Российский государственный
университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) имени
И.М. Губкина» / кафедра бурения нефтяных и
газовых скважин, профессор

Борейко Дмитрий Андреевич
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II» /
кафедра бурения скважин, доцент

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет» (г. Самара)

Защита диссертации состоится «13» февраля 2026 года в 10.00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.05, созданного при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 202__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

В настоящий момент оценку технического состояния оборудования в нефтяной и газовой промышленности всё чаще производят в режиме реального времени, это стало возможным благодаря использованию интеллектуальных систем мониторинга. Учитывая, что большая часть разрабатываемых нефтяных и газовых месторождений находится на поздней стадии эксплуатации, инновационные способы вторичного вскрытия продуктивной зоны пласта и горизонтальное бурение являются перспективными методами увеличения добычи. Для создания боковых стволов применяют технологию вырезания «окон» в обсадной колонне с помощью фрезерного инструмента, который подбирается индивидуально для каждой скважины. Своевременный контроль и оценка технического состояния фрезы и забойного двигателя, в случае его применения, в процессе эксплуатации позволяет избегать аварийных ситуаций.

Известно, что в процессе работы забойного бурового оборудования возникают случайные колебания технологических параметров рабочих элементов, входящих в состав технических систем, которые могут быть представлены в виде достаточно длительного временного ряда. Их анализ с применением вероятностно-статистических методов позволяет сформировать максимально достоверное представление о состоянии как отдельных рабочих элементов, так и технической системы в целом.

В настоящее время возникла задача разработки системы мониторинга в режиме реального времени для оценки технического состояния нового инновационного технического комплекса для вторичного вскрытия продуктивной зоны пласта, включающей малогабаритный секционный винтовой забойный двигатель и специальный фрезерный инструмент при фрезеровании «окон» в обсадных колоннах. Решению которой и посвящена настоящая работа.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами применения вероятностно-статистической оценки для определения технического состояния оборудования в процессе бурения и добычи как случайного процесса занимались: Ганджумян Р.А., Галеев А.С., Григулецкий В.Г., Гуреев И.Л., Ишемгужин Е.И., Ишемгужин И.Е., Керимов З.Г., Лягов А.В., Мирзаджанзаде А.Х., Науменко А.П., Санников Р.Х., Симонов В.В., Симонянц С.Л., Сулейманов И.Н., Хасанов М.М., Шайдаков В.В., Юнин Е.К., Ямалиев В.У. и многие другие исследователи.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы: пункт 8 – «Разработка и повышение эффективности методов предиктивного анализа, технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации».

Цель работы

Повышение эффективности диагностирования технической системы «винтовой забойный двигатель - фрезерный инструмент» в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне.

Задачи исследования

1 Анализ научно-технической информации при определении состояния технической системы «винтовой забойный двигатель - фрезерный инструмент» в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне.

2 Построение фазовой траектории движения металлической стружки в потоке технологической жидкости в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне.

3 Оценка технического состояния технической системы «винтовой забойный двигатель - фрезерный инструмент» в процессе фрезерования обсадной колонны для различных технологических ситуаций.

4 Разработка автоматизированной программы оценки технического состояния технической системы в процессе фрезерования обсадной колонны.

5 Повышение достоверности диагностирования путем вероятностно-статистической оценки состояния технической системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент».

Научная новизна

1 В процессе фрезерования «окна» в обсадной трубе при управлении значениями кинематических параметров компоновки получены фазовые траектории движения металлической стружки в потоке технологической жидкости для определения режимов течения.

2 Для технической системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» установлены пороговые значения критериев диагностирования для следующих неисправностей: заклинивание и подклинивание винтового забойного двигателя; износ фрезерного инструмента; нестабильная работа насосного оборудования и технической системы.

3 Разработаны варианты диагностической матрицы Байеса при анализе колебаний осевой нагрузки на фрезерный инструмент и колебаний давления технологической жидкости по статистически независимым критериям диагностирования с установлением их диагностической ценности.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в разработке вероятностно-статистического метода при оценке состояния технической системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент», определяемого по значениям колебаний давления технологической жидкости и осевой нагрузки, в процессе фрезерования «окна» в различных обсадных колоннах.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1 Разработанный критерий диагностирования работоспособности по Гуверу (патент РФ № 2819317) использован для определения состояния технической системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» в процессе фрезерования «окон» в обсадных колоннах различных диаметров и групп прочности на испытательном стенде компании ООО «Перфобур». В ходе испытаний установлены контрольные значения критериев диагностирования для

основных технологических ситуаций, возникающих в процессе фрезерования. Своевременное сравнение текущих и контрольных значений установленных критериев позволяет спрогнозировать отказы и повысить эффективность диагностирования всей технической системы (акты стендовых испытаний: № Ф-220425.01 от 25.04.2022, № Ф-220524.01 от 24.05.2022, № Ф-220614.01 от 14.06.2022, № Ф-230306.01 от 06.03.2023, № Ф-230529.01 от 29.05.2023).

2 Основные результаты исследований используются в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» в виде учебного пособия «Вероятностно-статистическая оценка состояния бурового оборудования» при преподавании дисциплин «Эксплуатация и оценка технического состояния оборудования нефтегазового производства» для магистрантов, обучающихся» по направлению 21.04.01 «Нефтегазовое дело».

3 Разработана автоматизированная программа для определения технического состояния оборудования в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне гидравлическими забойными двигателями (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024680895, № 2024688420).

Методология и методы исследования

Решение поставленных задач базируется на комплексе аналитических, численных и экспериментальных исследований, включающих систематизацию теоретических знаний и практического опыта, методов статистической обработки данных, математического моделирования и стендовых испытаний.

Положения, выносимые на защиту

1 Диагностический критерий и установление его контрольных значений при анализе колебаний осевой нагрузки и давления технологической жидкости для оценки состояния технической системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне.

2 Определение типа движения металлической стружки в потоке технологической жидкости в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне с помощью построений фазовых траекторий.

3 Методика диагностирования оборудования в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне.

4 Варианты диагностической матрицы Байеса для распознавания состояний технической системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» для повышения достоверности диагностирования.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивалась путем применения методов экспериментальных исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: международной научно-практической конференции «Роль математики в становлении специалиста» (Уфа, 2024), 75-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2024), международной научно-технической конференции «Первоочередные задачи нефтегазопромысловой механики и их решения» (Уфа, 2023), 50-ой Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, посвящённой 75-летию УГНТУ (Уфа, 2023), 49-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, посвященной 90-летию Башкирской нефти (Уфа, 2022), международной научно-технической конференции «Современные проблемы нефтегазового оборудования» (Уфа, 2021).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, получен 1 патент РФ на изобретение, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 учебное пособие.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников, включающего 177 наименований. Работа изложена на 181 странице машинописного текста, содержит 44 рисунка, 18 таблиц, 5 приложений.

Автор выражает благодарность генеральному директору ООО «Перфобур» канд. техн. наук Лягову И.А. и сотрудникам кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» за помощь в проведении исследований и обсуждении полученных результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и основные задачи, обозначены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов работы.

В первой главе приведена информация о развитии технологии вторичного вскрытия продуктивного пласта, конструкций фрезерного инструмента, а также о вероятностно-статистическом подходе к оценке технического состояния оборудования.

Установлено, что технологию фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне рассматривали в своих трудах: Воевидко И.В., Гасанов А.П., Гилязов Р.М., Зарипов Д.Э., Ишбаев Г.Г., Калинин А.Г., Левинсон Л.М., Лягов А.В., Лягов И.А., Мухаметшин А.А., Самигуллин В.Х., Хасанов А.Ф., Хейрабади Г.С., Чудык И.И. и многие другие.

В ходе работы установлено, что при фрезеровании «окна» в обсадной колонне состояние технической системы во многом определяется безотказностью винтового забойного двигателя (ВЗД) и фрезерного инструмента. В процессе эксплуатации технической системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» («ВЗД-ФИ») возникают колебания осевой нагрузки и давления технологической

жидкости. Эти колебания имеют случайный характер, а полученные на основе них закономерности имеют статистический смысл и появляются возможности для анализа состояния рассматриваемых технических систем.

Рассмотрены известные критерии косвенной оценки технического состояния оборудования, установлено, что их применение не дает универсальных рекомендаций о рациональном времени эксплуатации. Определено, что актуальным направлением является разработка автоматизированной системы оценки технического состояния оборудования в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне с применением методов математической статистики.

Во второй главе построены фазовые траектории движения металлической стружки в потоке технологической жидкости в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне на основании уравнений Лоренца и получены оптимальные значения параметров работы оборудования при проведении экспериментальных исследований.

Рассмотрены существующие математические модели процесса фрезерования на металлорежущих станках, определено, что ни одна из них не подходит для описания процесса фрезерования «окна» в обсадной колонне специальными малогабаритными ВЗД.

Установлено, что для снятия стружки металла при фрезеровании «окна» в обсадной колонне необходим циркуляционный тип движения. Исходя из этого предложено использовать модель Лоренца, определяющую тип движения. Данная модель способна предсказать, какой тип колебательного движения будет осуществляться в рабочей зоне в зависимости от осевой нагрузки на фрезерный инструмент, колебаний давления технологической жидкости, физико-механических характеристик обрабатываемого материала колонны, толщины снимаемого слоя и размеров инструмента. Параметры модели Лоренца функционально могут быть связаны с интенсивностью вибрации исходя из частоты вращения фрезы, с конструкцией и характеристиками конкретного ВЗД, с физико-механическими свойствами материала обсадной колонны (1):

$$\sigma = \beta = f(\omega_{\text{ВЗД}}, h, D), r = f(\omega, a_p, \Delta), b = f(D, \omega), \quad (1)$$

где $\omega_{\text{ВЗД}}$ – частота вращения винтового забойного двигателя, рад/с;

h – высота слоя обрабатываемого материала обсадной колонны, м;

Δ – амплитуда колебаний фрезерного инструмента, м;

a_p – отношение длины профрезерованного «окна» к его ширине;

D – поперечный размер слоя обрабатываемого материала обсадной колонны, м.

ω – частота вращения фрезерного инструмента, рад/с;

σ, r, b – параметры модели Лоренца.

С помощью системы уравнений Лоренца, установлены уравнения скорости, ускорения и перемещения инструмента при фрезеровании «окна» в обсадной колонне. Для обеспечения одинаковой размерности с помощью математической обработки при преобразовании системы, получены критерии подобия (K_i) параметров системы Лоренца при соблюдении размерности параметров модели (2): $\sigma \left[\frac{1}{c} \right], r \left[\frac{1}{c} + 1 + \text{м} \right], b \left[\text{м} - \frac{1}{c} \right]$. Для удобства, однозначности и точности расчета необходимо выразить соответствующие параметры исследуемой модели σ, r, b через расчетные значения (3).

$$\begin{cases} K_1 = \sigma \cdot \frac{t}{x} \cdot (y - x), \\ K_2 = rx \frac{t}{y} - t - \frac{xzt}{y}, \\ K_3 = 1 + b \cdot t - \frac{xyt}{z}. \end{cases} \quad (2) \quad \begin{cases} \sigma = \frac{\frac{dx}{dt} \cdot x}{(y-x)}, \\ r = \frac{\frac{dy}{dt} \cdot y + t \cdot y + x \cdot z \cdot t}{xt}, \\ b = \frac{\frac{dz}{dt} - 1 + \frac{xyt}{z}}{t}. \end{cases} \quad (3)$$

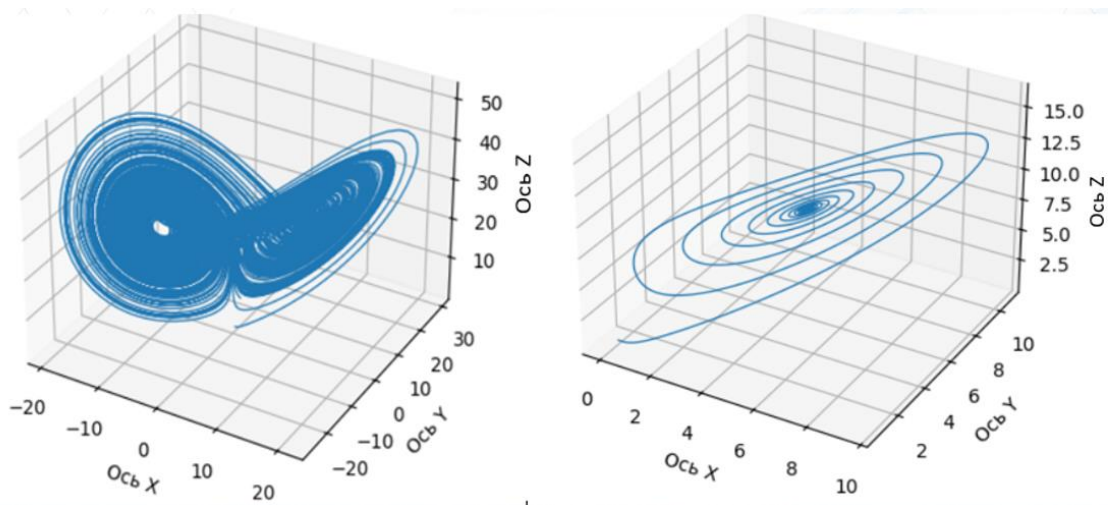
Данные критерии подобия позволяют получить аналитическое решение движения стружки в потоке технологической жидкости при фрезеровании «окна» в обсадной трубе, которое является подобным реальному процессу в скважине.

Установлено, что тип движения стружки определяется видом кривой, модели Лоренца, которую рисует отображающая точка в фазовом пространстве переменных x, y, z . Так, неподвижная точка соответствует отсутствию движения,

предельный цикл – циркуляционному движению, странный аттрактор – стохастическому.

Расчеты по уравнениям модели Лоренца для фрезерования «окна» в обсадной колонне без использования гидравлического нагружателя в составе технической системы, показали, что при частоте вращения ВЗД $\omega_{\text{ВЗД}} = 23$ рад/с, поперечной площади слоя выфрезерованного сегмента $S = 0,1056 \text{ м}^2$, толщине стенки $h = 0,008$ м, средней осевой нагрузке на фрезерный инструмент $F = 2145$ Н, крутящем моменте на валу двигателя $M = 252$ Н·м, перепаде давления технологической жидкости $P = 4200000$ Па, расходе технологической жидкости $Q = 3$ л/с, отображающая точка описывает цикл, показанный на Рисунке 1, а. В этом случае в качестве фазовой траектории получен странный аттрактор Лоренца, который представляет фрактальное множество, где осевая нагрузка на инструмент становится неуправляемой, скорость фрезерования – нестабильной, что приводит к отказу всей технической системы «ВЗД-ФИ».

При установке в техническую систему гидравлического нагружателя, работающего в режиме забойного автомата подачи фрезерного инструмента и демпфера продольных колебаний для возможности регулирования осевой нагрузки, отображающая точка описывает предельный цикл, показанный на Рисунке 1, б.



а) без гидравлического нагружателя

б) с гидравлическим нагружателем

Рисунок 1 – Отображение фазовой траектории движения стружки в технологической жидкости при фрезеровании обсадной колонны

Установлено, что при включении гидравлического нагружателя в техническую систему «ВЗД-ФИ», в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне наблюдается циркуляционный режим движения стружки в технологической жидкости, что говорит об удовлетворительной работе технической системы «ВЗД-ФИ», а следовательно, об эффективности применения данной компоновки.

Испытательный стенд ООО «Перфобур» предназначен для проведения полномасштабного объёмного эксперимента по фрезерованию «окна» в образце обсадной трубы, вмонтированной в цементно-песчаные блоки, изготовленные по стандартам API 19B. При этом обеспечивается математическое и физическое подобия параметров испытаний, благодаря чему скорости фрезерования и последующего бурения блоков идентичны с условиями фрезерования в промысловых условиях. Стенд оснащен современными средствами контроля параметров процессов фрезерования «окон» в обсадных трубах различных групп прочности и дальнейшего бурения разветвлённых каналов специальными ВЗД габарита 54 или 55 мм с одним углом перекоса.

На основании зависимостей механической скорости от приведенных значений частоты вращения фрезы (n) и осевой нагрузки на фрезерный инструмент (F), а также от момента вращения вала ВЗД (M) и перепада давления технологической жидкости (P) с помощью математических расчетов получены оптимальные значения параметров работы испытательного стенда: $n = 253 \text{ мин}^{-1}$, $F = 2145 \text{ Н}$, $M = 252 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $P = 4,2 \text{ МПа}$, которые обеспечивают нормальную работу двигателя.

Установлено, что полученные в работе уравнения регрессии можно считать адекватным с доверительной вероятностью 95 %, и, следовательно, их можно использовать для прогнозирования скорости фрезерования «окна» в обсадной колонне.

В третьей главе рассмотрен критерий диагностирования для оценки состояния технической системы «ВЗД-ФИ» с получением контрольных значений для различных обсадных колонн. Разработана методика диагностирования для

прогнозирования работы оборудования технической системы в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне.

На основании известного в экономике критерия Гувера, описывающего долю общего объема значений, которая должна быть перераспределена для достижения равновесия, разработан критерий диагностирования, и его контрольные значения, соответствующие различным технологическим ситуациям в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне. Применение данного критерия позволит повысить эффективность оценки технического состояния системы «ВЗД-ФИ».

На Рисунке 2 показана схема для определения оценки состояния технической системы при фрезеровании эксплуатационной колонны «окна» в промышленных условиях, которая реализуется следующим образом: фрезерный инструмент в составе компоновки низа бурильной колонны спускают в скважину на нужную глубину. Индикатор веса устанавливают на неподвижном конце талевого каната для измерения колебаний осевой нагрузки на фрезерный инструмент, а цифровой манометр – на манифольдной линии насоса для измерения колебаний давления технологической жидкости.

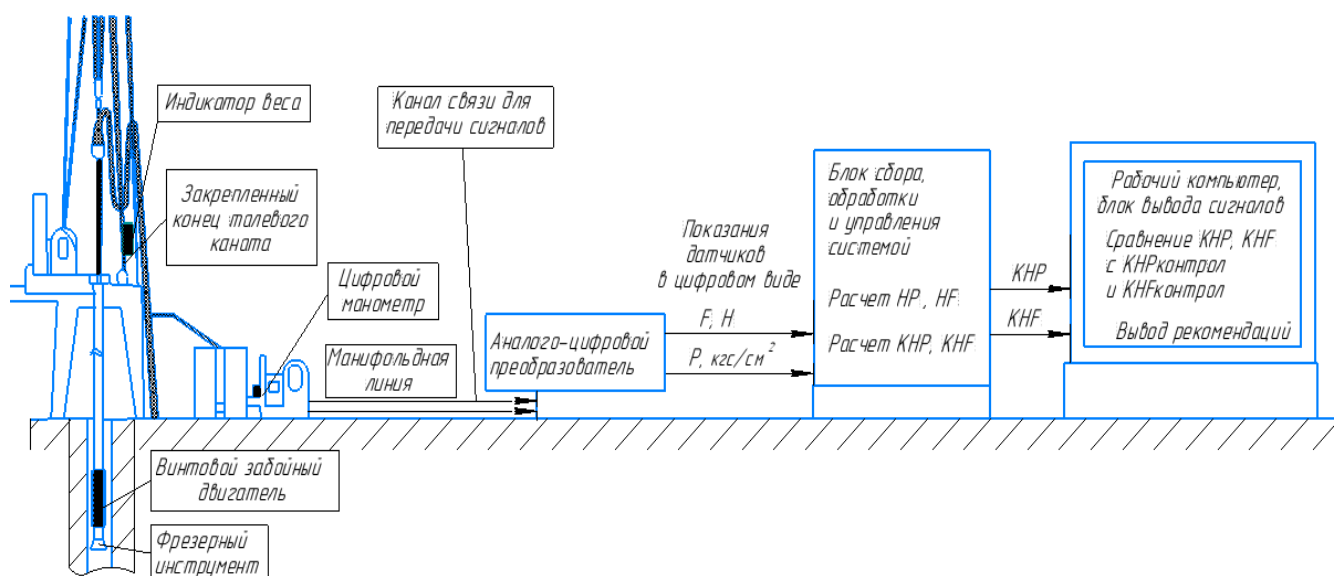


Рисунок 2 – Схема устройств для оценки состояния технической системы «ВЗД-ФИ»

При фрезеровании эксплуатационной колонны колебания осевой нагрузки и

давления, каждый по своему каналу связи, поступают на аналого-цифровой преобразователь. Блок сбора, обработки и управления формирует управляющие сигналы и вычисляет критерий работоспособности по Гуверу H_p колебаний давления технологической жидкости и критерий работоспособности по Гуверу H_F колебаний осевой нагрузки на фрезу в любой момент фрезерования на основании этих значений вычисляются текущие критерии диагностирования K_{HP} и K_{HF} . Информация поступает на рабочий компьютер и блок индикации, которые предназначены для визуального контроля за изменением текущих величин критериев диагностирования K_{HP} и K_{HF} , данные значения сравниваются с контрольными $K_{HP\text{контрол}}$ и $K_{HF\text{контрол}}$, полученными на испытательном стенде для различных условий фрезерования. На блоке индикации выводится сигнал, соответствующий той технологической ситуации, в которой находится рассматриваемая техническая система.

Критерий диагностирования определяют по формулам (4, 5):

$$K_{HP} = H_{p2} / H_{p1}, \quad (4)$$

$$K_{HF} = H_{F2} / H_{F1}, \quad (5)$$

где K_{HP} , K_{HF} – критерии диагностирования соответственно значений колебаний давления технологической жидкости и значений осевой нагрузки в процессе фрезерования;

H_{p1} и H_{F1} – критерии работоспособности по Гуверу соответственно значений колебаний давления технологической жидкости и значений колебаний осевой нагрузки в начале фрезерования;

H_{p2} и H_{F2} – критерии работоспособности по Гуверу соответственно значений колебаний давления технологической жидкости и значений осевой нагрузки в процессе фрезерования в текущий момент времени.

Экспериментальные исследования проведены на стенде ООО «Перфобур». В результате установлены основные виды технологических ситуаций технической системы «ВЗД-ФИ», возникающих при фрезеровании «окна» в обсадной колонне,

и соответствующие им значения критериев диагностирования. В Таблицу 1 сведены все результаты расчетов критериев диагностирования $K_{НР}$ и $K_{НФ}$ для различных типов фрезерных инструментов и обсадных колонн.

Таблица 1 – Результаты расчетов критериев диагностирования в зависимости от типа обсадной колонны и фрезерного инструмента

Характеристики фрезерного инструмента	Характеристики обсадной колонны	Контрольные $K_{НР}$ и $K_{НФ}$	Технологическая ситуация и критерии $K_{НР}$ и $K_{НФ}$, соответствующий ей
Диаметр – 75 мм, 3-х лопастная с твердосплавной крошкой и твердосплавными пластинами	- диаметр 146 мм; - толщина стенки 8 мм; - группа прочности: Д	- $K_{НР} > 1,6$ - $K_{НФ} > 2,0$	1 Заклинивание ВЗД: $K_{НР} > 1,6$ и $K_{НФ} > 2,0$. 2 Подклинивание ВЗД: $K_{НР} > 1,6$ или $K_{НФ} > 2,0$. 3 Износ фрезерного инструмента: $K_{НР} < 1,1$ и $1,4 < K_{НФ} \leq 2,0$. 4 Нестабильная работа насосного оборудования: $1,1 < K_{НР} \leq 1,6$ и $K_{НФ} < 1,4$ 5 Нестабильная работа технической системы: $1,1 < K_{НР} \leq 1,6$ и $1,4 < K_{НФ} \leq 2,0$ 6 Отключение датчиков: $K_{НФ} = 0,0$ или $K_{НР} = 0,0$ 7 Стабильная работа: $K_{НР} < 1,1$ и $K_{НФ} < 1,4$
Диаметр – 75 мм, 6-ти лопастная с цилиндрическими вставками ВК8 и наплавкой карбида вольфрама	- диаметр 146 мм; - толщина стенки 8 мм; - группа прочности: Д	- $K_{НР} > 1,6$ - $K_{НФ} > 2,0$	1 Заклинивание ВЗД: $K_{НР} > 1,6$ и $K_{НФ} > 2,0$. 2 Подклинивание ВЗД: $K_{НР} > 1,6$ или $K_{НФ} > 2,0$. 3 Износ фрезерного инструмента: $K_{НР} < 1,1$ и $1,4 < K_{НФ} \leq 2,0$. 4 Нестабильная работа насосного оборудования: $1,1 < K_{НР} \leq 1,6$ и $K_{НФ} < 1,4$ 5 Нестабильная работа технической системы: $1,1 < K_{НР} \leq 1,6$ и $1,4 < K_{НФ} \leq 2,0$ 6 Стабильная работа: $K_{НР} < 1,1$ и $K_{НФ} < 1,4$
Диаметр – 75 мм, с карбидом вольфрама и PDC зубками-вставками	- диаметр 168 мм; - толщина стенки 9,5 мм; - группа прочности: Д	- $K_{НР} > 1,7$ - $K_{НФ} > 2,5$	1 Заклинивание ВЗД: $K_{НР} > 1,7$ и $K_{НФ} > 2,5$. 2 Подклинивание ВЗД: $K_{НР} > 1,7$ или $K_{НФ} > 2,5$. 3 Износ фрезерного инструмента: $K_{НР} < 1,1$ и $1,4 < K_{НФ} \leq 2,5$. 4 Нестабильная работа насосного оборудования: $1,1 < K_{НР} \leq 1,7$ и $K_{НФ} < 1,4$ 5 Нестабильная работа технической системы: $1,1 < K_{НР} \leq 1,7$ и $1,4 < K_{НФ} \leq 2,5$ 6 Стабильная работа: $K_{НР} < 1,1$ и $K_{НФ} < 1,4$

Продолжение таблицы 1

Характеристики фрезерного инструмента	Характеристики обсадной колонны	Контрольные $K_{НР}$ и $K_{НФ}$	Технологическая ситуация и критерии $K_{НР}$ и $K_{НФ}$, соответствующий ей
Диаметр – 82 мм, с дробленным карбидом вольфрама	- диаметр 178 мм; - толщина стенки 10,8 мм; - группа прочности: Е	- $K_{НР} > 1,9$ - $K_{НФ} > 3,5$	1 Заклинивание ВЗД: $K_{НР} > 1,9$ и $K_{НФ} > 3,5$. 2 Подклинивание ВЗД: $K_{НР} > 1,9$ или $K_{НФ} > 3,5$. 3 Износ фрезерного инструмента: $K_{НР} < 1,1$ и $1,4 < K_{НФ} \leq 3,5$. 4 Нестабильная работа насосного оборудования: $1,1 < K_{НР} \leq 1,9$ и $K_{НФ} < 1,4$ 5 Нестабильная работа технической системы: $1,1 < K_{НР} \leq 1,9$ и $1,4 < K_{НФ} \leq 3,5$ 6 Стабильная работа: $K_{НР} < 1,1$ и $K_{НФ} < 1,4$
Диаметр – 75 мм, с дробленными частями карбида вольфрама	- диаметр 245 мм; - толщина стенки 8,5 мм; - группа прочности: Д	- $K_{НР} > 2,8$ - $K_{НФ} > 3,0$	1 Заклинивание ВЗД: $K_{НР} > 2,8$ и $K_{НФ} > 3,0$ 2 Подклинивание ВЗД: $K_{НР} > 2,8$ или $K_{НФ} > 3,0$ 3 Износ фрезерного инструмента: $K_{НР} < 1,1$ и $1,4 < K_{НФ} \leq 3,0$ 4 Нестабильная работа насосного оборудования: $1,1 < K_{НР} \leq 2,8$ и $K_{НФ} < 1,4$ 5 Нестабильная работа технической системы: $1,1 < K_{НР} \leq 2,8$ и $1,4 < K_{НФ} \leq 3,0$ 6 Стабильная работа: $K_{НР} < 1,1$ и $K_{НФ} < 1,4$

Таким образом, установлены контрольные значения критериев диагностирования для различных диаметров и групп прочности обсадных колонн и фрезерных инструментов.

На Рисунках 3 и 4 изображены записи интервала колебаний давления технологической жидкости и осевой нагрузки на фрезерный инструмент в режиме реального времени в процессе фрезерования со значениями критериев диагностирования. Установлено, что перед моментом заклинивания ВЗД (интервал заклинивания 8821-8880 с) критерии диагностирования превысили контрольные значения.

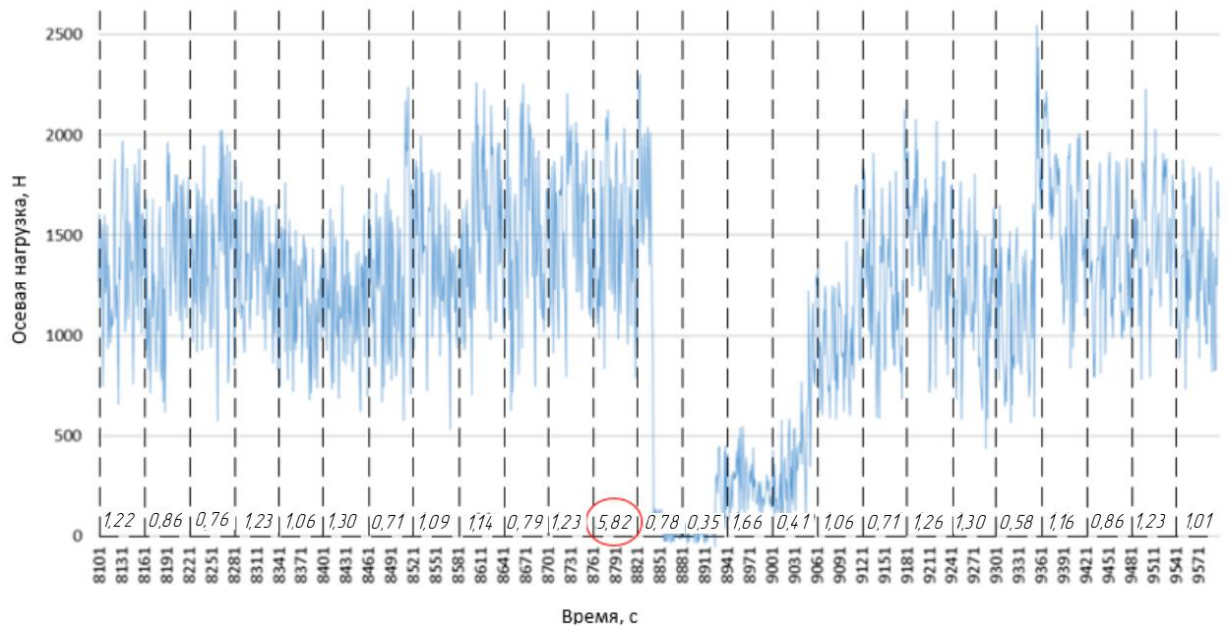


Рисунок 3 – Запись интервала колебаний осевой нагрузки по времени со значениями критерия диагностирования

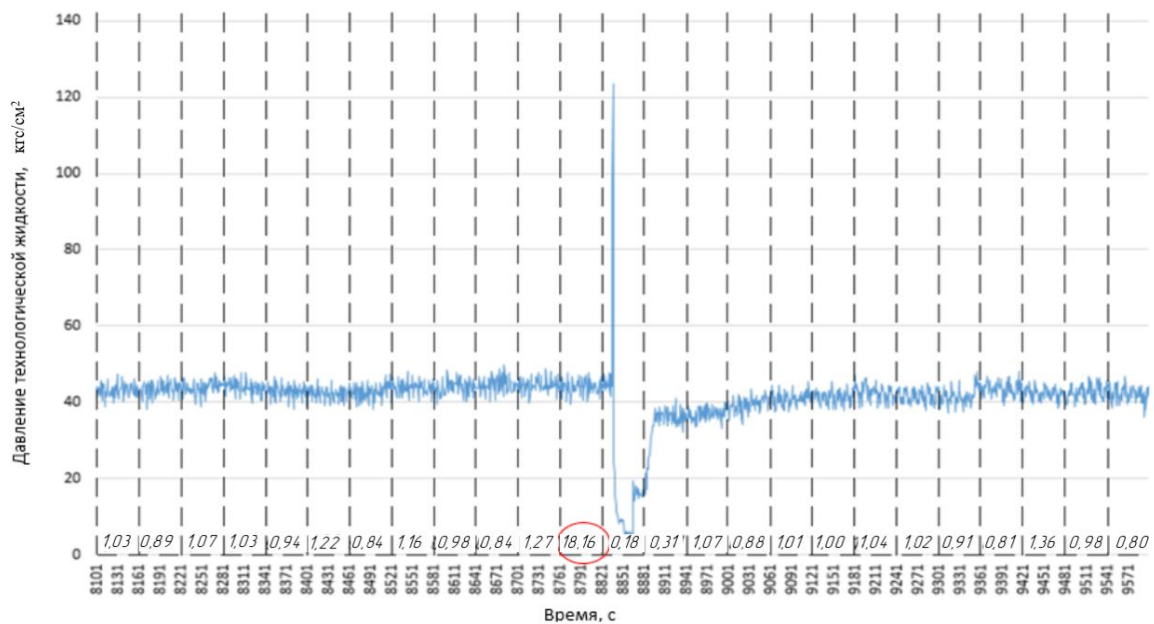


Рисунок 4 – Запись интервала колебаний давления технологической жидкости по времени со значениями критерия диагностирования

Для своевременного мониторинга состояния технической системы «ВЗД-ФИ» в процессе фрезерования обсадной колонны разработана программа для автоматизированного расчета на языке программирования «Python». Она основана на вычислении предложенного критерия диагностирования с определением основных технологических ситуаций и может применяться при разработке автоматизированных систем управления процессом фрезерования.

На Рисунке 5 показан общий алгоритм работы автоматизированной программы. На блок обработки информации поступает запись колебаний давления технологической жидкости и осевой нагрузки в зависимости от типа обсадной колонны и фрезерного инструмента. Далее происходит расчет критериев диагностирования по алгоритму, представленному в диссертационной работе. Исходя из двух полученных значений каждую минуту испытания на экран выводится один из восьми возможных сигналов, описывающих определенную технологическую ситуацию.

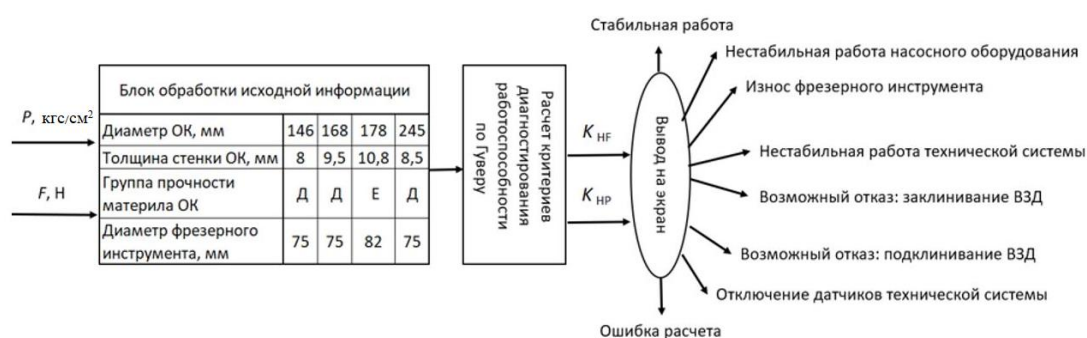


Рисунок 5 – Общий алгоритм работы автоматизированной программы

В качестве примера на Рисунке 6 показаны два фрагмента вывода результатов работы программы при испытании технической системы «ВЗД-ФИ» с фрезой диаметром 75 мм для обсадной колонны диаметром 245 мм с толщиной стенки 8,5 мм и группой прочности Д.

Установлено, что на интервале от 155 до 163 минут, который соответствует процессу активного фрезерования «окна» в обсадной колонне, на экран компьютера выводятся следующие сигналы (Рисунок 6, а):

- стабильная работа технической системы – две минуты;
- подклинивание ВЗД – три минуты;
- нестабильная работа насосного оборудования – четыре минуты.

При сигнале «Следующий интервал – Возможный отказ: Подклинивание ВЗД» для оператора выводится рекомендация по уменьшению осевой нагрузки.

Установлено, что на интервале от 427 до 435 минут, который соответствует работе фрезерного инструмента по цементно-песчаным блокам, на экран

компьютера выводятся следующие сигналы (Рисунок 6, б):

- нестабильная работа насосного оборудования – одна минута;
- износ фрезерного инструмента – три минуты;
- стабильная работа технической системы – пять минут.

155.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа насосного оборудования	427.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
0.905	427.0 минута --- МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ
4.329	0.906
156.0 минута --- След. интервал – Возможный отказ: Подклинивание ВЗД	2.008
УМЕНЬШИТЕ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ И ВЫХОДИТЕ НА РЕЖИМ	428.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа: Износ фрезерного инструмента
1.112	428.0 минута --- ЕСЛИ СКОРОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНО СНИЖАЕТСЯ, ОТКЛЮЧИТЕ НАСОС, ПОДНИМИТЕ ФРЕЗУ
0.298	0.99
157.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа насосного оборудования	1.462
1.538	429.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа: Износ фрезерного инструмента
0.415	429.0 минута --- ЕСЛИ СКОРОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНО СНИЖАЕТСЯ, ОТКЛЮЧИТЕ НАСОС, ПОДНИМИТЕ ФРЕЗУ
158.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа насосного оборудования	0.982
0.591	0.744
3.861	430.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
159.0 минута --- След. интервал – Возможный отказ: Подклинивание ВЗД	430.0 минута --- МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ
УМЕНЬШИТЕ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ И ВЫХОДИТЕ НА РЕЖИМ	1.066
1.236	1.066
0.35	431.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
160.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа насосного оборудования	431.0 минута --- МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ
0.938	1.095
6.485	0.786
161.0 минута --- След. интервал – Возможный отказ: Подклинивание ВЗД	432.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
УМЕНЬШИТЕ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ И ВЫХОДИТЕ НА РЕЖИМ	432.0 минута --- МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ
0.892	0.874
0.196	1.354
162.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы	433.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
1.008	433.0 минута --- МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ
0.715	1.124
163.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы	0.61
0.924	434.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа насосного оборудования
0.778	1.047
	1.981
	435.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа: Износ фрезерного инструмента
	435.0 минута --- ЕСЛИ СКОРОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНО СНИЖАЕТСЯ, ОТКЛЮЧИТЕ НАСОС, ПОДНИМИТЕ ФРЕЗУ
	0.898
	0.718

а) время интервала фрезерования
от 155 до 163 мин

б) время интервала фрезерования
от 427 до 435 мин

Рисунок 6 – Фрагмент результатов работы программы

При сигнале «Следующий интервал – Нестабильная работа: Износ фрезерного инструмента» для оператора выводится рекомендация по дальнейшей эксплуатации.

С помощью методики диагностирования, заложенной в автоматизированную программу возможно проводить своевременный мониторинг и прогнозирование состояния технической системы «ВЗД-ФИ».

В результате проведенных стендовых испытаний установлены следующие рекомендации:

1) по сигналу «Следующий (след.) интервал – стабильная работа технической системы»: если сигнал появляется постоянно в течение 10-15 минут, то можно увеличить осевую нагрузку;

2) по сигналу «След. интервал – нестабильная работа насосного

оборудования»: если в течение десяти минут, данный сигнал сработал более шести раз, то необходимо: отключить насосный агрегат; проверить правильность технологии сборки и монтажа оборудования; убедиться в отсутствии дефектов, вызванных износом при эксплуатации; удостовериться в отсутствии загрязнения технологической жидкости и всех основных элементов;

3) по сигналу «След. интервал – нестабильная работа: износ фрезерного инструмента» – необходимо обратить внимание на механическую скорость фрезерования, если в течение 20-ти минут скорость постоянно снижается и сигнал об износе появляется не менее, чем каждые три минуты, то нужно отключить насосный агрегат, поднять фрезерный инструмент и провести визуальный осмотр на наличие дефектов, сколов и т. д.;

4) по сигналу «След. интервал – возможный отказ: заклинивание ВЗД» – необходимо отключить насосный агрегат и отвести фрезерный инструмент от колонны; отключить установку и перезапустить насосный агрегат; далее включить установку с уменьшенной нагрузкой;

5) по сигналу «След. интервал – возможный отказ: подклинивание ВЗД» – необходимо: уменьшить осевую нагрузку и заново выйти на режим. Если после этого сигнал появился снова в течение двух минут – необходимо отключить установку и насосный агрегат, далее включить установку с уменьшенной нагрузкой;

6) по сигналу «След. интервал – нестабильная работа технической системы» – если скорость параллельно снижается, необходимо отключить насосный агрегат, после этого отключить и перезапустить установку;

7) по сигналу «След. интервал – отключение датчиков технической системы» необходимо подключить датчики технической системы обратно.

В качестве примера для оценки состояния технической системы «ВЗД-ФИ» при фрезеровании «окна» в обсадной колонне диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм и группой прочности Д применен вероятностно-статистический метод распознавания, основанный на уравнении Байеса, с последующим построением одноименных матриц (Таблицы 2, 3) по статистически независимым критериям, в

этих таблицах содержатся вероятности разрядов признаков и соответствующее им вероятности предполагаемых диагнозов.

Обозначения, используемые в матрице Байеса: D_1 – стабильная работа технической системы «ВЗД-ФИ»; D_2 – нестабильная работа технической системы «ВЗД-ФИ»; Z_{D_i} – диагностическая ценность обследования; $P(K_i)$ – вероятность диагноза, определяемая по статистическим данным.

Таблица 2 – Диагностическая матрица по колебаниям давления технологической жидкости в процессе фрезерования обсадной колонны

Диагноз	Статистические показатели оценки технического состояния системы «ВЗД-ФИ», K_i														
	$KЭ_F$, критерий диагностирования по энтропийному анализу					KHe_F , критерий диагностирования по показателю Херста					KHF , критерий диагностирования по Гуверу				
	K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{14}	K_{15}	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}	K_{25}	K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{34}	K_{35}
	0,10- 0,52	0,52- 0,94	0,94- 1,35	1,35- 1,77	1,77- 2,19	0,19- 1,01	1,01- 1,83	1,83- 2,65	2,65- 3,47	2,65- 3,47	0,00- 3,63	3,63- 7,26	7,26- 10,89	10,89- 14,52	14,52- 18,16
D_1	0,003	0,015	0,005	0,023	0,935	0,560	0,440	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D_2	0,055	0,018	0,018	0,018	0,851	0,604	0,377	0,000	0,000	0,019	0,764	0,036	0,073	0,055	0,073
$P(K_i)$	0,009	0,016	0,007	0,022	0,946	0,565	0,432	0,000	0,000	0,002	0,971	0,004	0,009	0,007	0,009
Z_{D1}	-1,81	-0,03	-0,39	0,04	-0,02	-0,01	0,02	-	-	-	0,04	-	-	-	-
Z_{D2}	2,60	0,21	1,43	-0,31	-0,15	0,09	-0,20	-	-	3,07	-0,35	1,65	1,69	1,65	1,65

Таблица 3 – Диагностическая матрица по колебаниям осевой нагрузки в процессе фрезерования обсадной колонны

Диагноз	Статистические показатели оценки технического состояния системы «ВЗД-ФИ», K_i														
	$KЭ_F$, критерий диагностирования по энтропийному анализу					KHe_F , критерий диагностирования по показателю Херста					KHF , критерий диагностирования по Гуверу				
	K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{14}	K_{15}	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}	K_{25}	K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{34}	K_{35}
	0,07- 0,38	0,38- 0,68	0,68- 0,99	0,99- 1,30	1,30- 1,61	0,23- 1,05	1,05- 1,86	1,86- 2,68	2,68- 3,49	3,49- 4,31	0,00- 2,20	2,20- 4,40	4,40- 6,60	6,60- 8,80	8,80- 11,00
D_1	0,005	0,008	0,015	0,095	0,877	0,731	0,269	0,000	0,000	0,000	0,992	0,005	0,000	0,000	0,003
D_2	0,000	0,000	0,058	0,135	0,808	0,667	0,314	0,000	0,000	0,020	0,782	0,091	0,036	0,036	0,055
$P(K_i)$	0,005	0,007	0,020	0,100	0,869	0,723	0,274	0,000	0,000	0,002	0,966	0,016	0,004	0,004	0,009
Z_{D1}	0,18	0,18	-0,40	-0,07	0,01	0,01	-0,03	-	-	-	0,04	-	-	-	-
Z_{D2}	-	-	1,50	0,44	-0,11	-0,12	0,19	-	-	3,11	-0,31	1,69	1,81	1,81	1,69

Установлено, что одной из важных задач при повышении эффективности диагностирования является использование критериев с наибольшей диагностической ценностью. Исходя из этого по результатам, полученным из матриц Байеса, определена общая диагностическая ценность Z_{D_i} процесса фрезерования по всем интервалам обследования K_i , которая заключается в

определении вероятности диагнозов с учётом состояния технической системы «ВЗД-ФИ» для повышения эффективности её диагностирования:

1) по колебаниям давления технологической жидкости:

$Z_{D1}(K_1) = 0,886$	$Z_{D2}(K_1) = 0,806$
$Z_{D1}(K_2) = 0,507$	$Z_{D2}(K_2) = 0,505$
$Z_{D1}(K_3) = 0,971$	$Z_{D2}(K_3) = 0,743$

2) по колебаниям осевой нагрузки:

$Z_{D1}(K_1) = 0,772$	$Z_{D2}(K_1) = 0,716$
$Z_{D1}(K_2) = 0,602$	$Z_{D2}(K_2) = 0,568$
$Z_{D1}(K_3) = 0,959$	$Z_{D2}(K_3) = 0,758$

Из полученных данных определено, что наибольшей диагностической ценностью для диагноза D_1 – «стабильная работа» обладает показатель $Z(K_3)$ с вероятностью 0,971 (по колебаниям давления технологической жидкости) и $Z(K_3)$ с вероятностью 0,959 (по колебаниям осевой нагрузки).

Для диагноза D_2 – «нестабильная работа» обладает показатель $Z(K_1)$ с вероятностью 0,804 (по колебаниям давления технологической жидкости) и $Z(K_3)$ с вероятностью 0,758 (по колебаниям осевой нагрузки).

Таким образом для диагностирования системы «ВЗД-ФИ» в режиме реального времени в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне достаточным является применение только одного критерия диагностирования работоспособности по Гуверу.

Результаты по диагностированию и автоматизации оценки состояния технической системы «ВЗД-ФИ» используются при проведении стендовых испытаний оборудования в процессе фрезерования «окон» в обсадных колоннах для их дальнейшего применения в промысловых условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ научно-технической информации об определении состояния технической системы «ВЗД-ФИ» показал, что применение существующих критериев для определения работоспособного состояния оборудования не дает

универсальных рекомендаций о рациональном времени его работы, и актуальным направлением является разработка автоматизированной системы оценки технического состояния оборудования в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне.

2 Установлены фазовые траектории движения металлической стружки в потоке технологической жидкости в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне для циркуляционного и стохастического типа движения.

3 Установлены контрольные значения критериев диагностирования для оценки состояния технической системы «ВЗД-ФИ», соответствующие различным технологическим ситуациям в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне:

- для обсадной колонны диаметром 146 мм, толщиной стенки 8 мм и группой прочности Д: $K_{НР\text{контрол}} = 1,6$ и $K_{НФ\text{контрол}} = 2,0$;

- для обсадной колонны диаметром 168 мм, толщиной стенки 9,5 мм и группой прочности Д: $K_{НР\text{контрол}} = 1,7$ и $K_{НФ\text{контрол}} = 2,5$;

- для обсадной колонны диаметром 178 мм, толщиной стенки 10,8 мм и группой прочности Е: $K_{НР\text{контрол}} = 1,9$ и $K_{НФ\text{контрол}} = 3,5$;

- для обсадной колонны диаметром 245 мм, толщиной стенки 8,5 мм и группой прочности Д: $K_{НР\text{контрол}} = 2,8$ и $K_{НФ\text{контрол}} = 3,0$.

4 Разработана автоматизированная программа для диагностирования технической системы «ВЗД-ФИ», позволяющая проводить своевременный мониторинг состояния оборудования и вывода на экран рекомендаций по эксплуатации в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне.

5 Исходя из значений колебаний давления технологической жидкости и осевой нагрузки предложены варианты диагностической матрицы Байеса по статистически независимым критериям диагностирования с последующим определением диагностической ценности для эффективного диагностирования состояния технической системы «ВЗД-ФИ» в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне специальными малогабаритными винтовыми забойными двигателями.

Основные результаты работы опубликованы в 16 научных трудах, в том числе:

- в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

- 1 Шестакова Е.В. О различных подходах использования фрезерного инструмента // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – №. 5. – С. 118-136.
- 2 Математический аттрактор модели процесса движения смеси «стружка-жидкость» при фрезеровании обсадной колонны специальными забойными двигателями / И.А. Лягов, А.В. Лягов, Е.В. Шестакова, И.Н. Сулейманов, В.У. Ямалиев // Бурение и нефть. – 2025. – № 4 – С. 28-36.
- 3 О работоспособном состоянии инструмента в процессе фрезерования обсадной колонны забойными двигателями / Е.В. Шестакова, И.А. Лягов, В.У. Ямалиев, А.В. Лягов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 5. – С. 526-532.
- 4 Использование критерия диагностирования для определения работоспособности фрезерного инструмента / Е.В. Шестакова, И.А. Лягов, В.У. Ямалиев, А.В. Лягов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2024. – № 10(382). – С. 29-37.
- 5 Безотказность винтовых забойных двигателей / В.В. Шайдаков, В.А. Шулёпов, Е.В. Шестакова // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2020. – № 9 (333). – С. 21-24.

- технические объекты интеллектуальной собственности:

- 1 ЭВМ № 2024688420 Автоматизированная программа определения технического состояния оборудования в процессе фрезерования обсадной колонны / Шестакова Е.В., Лягов И.А., Ямалиев В.У., Лягов А.В.; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – № 2024686829; заявл. 11.11.2024; опублик. 27.11.2024. – Бюл. № 12.
- 2 ЭВМ № 2024680895 Автоматизированная программа определения технического состояния фрезерного инструмента / Шестакова Е.В., Лягов И.А., Ямалиев В.У., Лягов А.В.; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – № 2024663609; заявл. 14.06.2024; опублик. 03.09.2024. – Бюл. № 9.
- 3 Пат. 2819317 С1 Российская Федерация, МПК E21B 47/007, E21B 45/00. Способ определения работоспособности фрезерного инструмента / Шестакова Е.В., Лягов И.А., Ямалиев В.У. [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – № 2023133380; заявл. 12.12.2023; опублик. 17.05.2024. – Бюл. № 14. – 14 с.

- публикации в прочих изданиях:

- 1 Вероятностно-статистическая оценка состояния бурового оборудования : учебное пособие / В.У. Ямалиев, Е.В. Шестакова ; УГНТУ. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2023. – 48 с. – ISBN 978-5-7831-2319-1.
- 2 Способ определения работоспособности фрезерного инструмента / Е.В. Шестакова, И.А. Лягов. В сборнике: Роль математики в становлении специалиста-2024: материалы Международной научно-практической конференции. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2024. – С. 156-161.
- 3 О работе фрезерного инструмента / Е.В. Шестакова // Материалы 75-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. В 2 т. / отв. ред. И.Г. Ибрагимов. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2024. – с. 65.
- 4 Автоматизация технологических процессов работы породоразрушающего и фрезерного инструментов для технической системы «Перфобур» / Шестакова Е.В., Лягов И.А., Зинатуллина Э.Я., Ямалиев В.У., Лягов А.В., Сулейманов И.Н. // Первоочередные задачи нефтегазопромысловой механики и их решения – 2023. Материалы Международной научно-технической конференции «Первоочередные задачи нефтегазопромысловой механики и их решения» УГНТУ. – Уфа, 2023. – С. 317-325.
- 5 Испытания оконного фрезера ООО НПП «БУРИНТЕХ» на стенде ООО «ПЕРФОБУР»/ Меджитов А.С., Лягов А.В., Лягов И.А., Шестакова Е.В. Материалы 50-ой Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, посвящённой 75-летию УГНТУ / коллектив авторов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2023. – с. 702-706.
- 6 Малогабаритные фрезы для технической системы «Перфобур» / Е. В. Шестакова, Д. Л. Касимов, И. А. Лягов, В. У. Ямалиев. // Материалы 49-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, посвященной 90-летию Башкирской нефти / коллектив авторов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. – с. 379-384 с.
- 7 Освоение скважин по технологии компании «Перфобур» / Е. В. Шестакова, И. А. Лягов, В.С. Полухин, А.А. Новоселов, Д.Р. Исангулов, А.В. Лягов. // Материалы 49-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, посвященной 90-летию Башкирской нефти / коллектив авторов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. – с. 384-391 с.
- 8 Критерии оценки технического состояния объекта при случайных колебаниях / Е. В. Шестакова, В. У. Ямалиев // В сборнике: Современные проблемы нефтегазового оборудования-2021. Материалы Международной научно-технической конференции, 2021. – С. 319-324.