

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

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)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, проф.
Ямалиев Виль Узбекович

Уфа 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ	10
1.1 Анализ развития конструкций фрезерного инструмента	11
1.2 Вероятностно-статистическая оценка технического состояния оборудования	23
1.2.1 Коэффициент Джини	26
1.2.2 Энтропийный анализ	27
1.2.3 Коэффициент вариации и дисперсия	28
1.2.4 Показатель Херста	29
1.2.5 Выбросы случайных колебаний	30
1.2.6 Корреляционная размерность	30
1.2.7 Спектральный анализ	31
1.2.8 Фрактальный анализ	32
1.2.9 Рекуррентный анализ	32
1.2.10 Вейвлет-анализ	33
1.2.11 Метод Байеса	33
Выводы по первой главе	34
ГЛАВА 2 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ СПЕЦИАЛЬНЫМ ВЗД	35
2.1 Теоретические исследования математической модели	35
2.2 Определение оптимальных параметров системы «ВЗД-ФИ» для проведения стендовых испытаний.....	49
Выводы по второй главе	65
ГЛАВА 3 ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ВЗД-ФИ» ДЛЯ	

РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ	67
3.1 Разработка нового критерия для оценки технического состояния системы «ВЗД-ФИ»	67
3.2 Определение технического состояния системы «ВЗД-ФИ» для различных обсадных колонн и фрезерных инструментов.....	77
3.3 Автоматизированная программа определения технического состояния технической системы «ВЗД-ФИ» в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне	115
3.4 Вероятностно-статистическая оценка состояния технической системы «ВЗД-ФИ»	122
Выводы по третьей главе	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	149
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное) Патент на изобретение	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное) Справка о внедрении результатов исследования.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ В (справочное) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (справочное) Данные интервала записи колебаний технологических параметров в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне	178
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (справочное) Справка о внедрении результатов исследования в учебный процесс	180

ВВЕДЕНИЕ

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В настоящее время, по оценке Минэнерго РФ, доля трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) в России составляет более 65 % от общего объема доказанных нефтяных запасов, при этом доля добычи ТРИЗ около 8 %, и увеличение динамики не существенно [146]. Известно, что на множестве скважин добыча остановлена из-за прекращения поступления пластового флюида или в связи с высоким содержанием воды в получаемой нефтяной продукции. Неэкономичность добычи нефти на скважинах с ТРИЗ зачастую приводит к их консервации или полному закрытию, по оценкам экспертов их число составляет от 25 до 30 тысяч [135].

По этой причине важным этапом разработки скважины является вторичное вскрытие, осуществляемое перфорированием, с использованием различных перфораторов (пулевых, кумулятивных, гидropескоструйных, фрезерных и торпедных разновидностей):

1) при применении пулевых и торпедных устройств – отверстия создаются за счет детонации заряда в особых камерах и выбрасываемых энергией взрыва пуль и торпед соответственно. Основные недостатки: имеют ограниченное применение, не всегда обеспечивают нужное пробитие из-за малой длины канала;

2) при кумулятивной перфорации обсадная колонна (ОК) подвергается воздействию направленной огненной струи, которая прожигает отверстия в металле. Основные недостатки: возможна деформация колонны и повреждение цементного камня;

3) при гидropескоструйной перфорации используют направленную струю, однако в качестве разрушающего агента выступает вода, в которую для повышения абразивных свойств добавляют песок. Основной недостаток: возможно возникновение блокирующей зоны продуктивного пласта, снижающей его продуктивность.

Подбор технологии перфорации скважины определяется различными характеристиками [4]:

- условиями проведения буровых работ;
- геологическими характеристиками месторождения;
- конструкцией скважины;
- техническими параметрами перфорационных устройств (тип, плотность прострела и т. д.);
- вероятными побочными эффектами и прочими факторами.

Известно, что вторичное вскрытие может быть осуществлено с помощью бурения горизонтальных скважин и боковых стволов с горизонтальной частью, при этом они имеют схожие подходы [84].

Развитие технологий горизонтального бурения, активно внедряемых российскими нефтедобывающими компаниями, способствует оптимизации сети эксплуатационных скважин и, как следствие, росту доступных для разработки запасов нефти. Это приводит к снижению депрессии на пласт, повышению эффективности добычи нефти из сложных месторождений, ранее считавшихся не извлекаемыми, и увеличению результативности применения методов воздействия на нефтеносные пласты [11, 46]. За последние пятнадцать лет в России наблюдается значительный рост строительства горизонтальных скважин. В настоящий момент времени происходит переход от индивидуального бурения горизонтальных скважин к систематическому применению этой технологии, что дает возможность полностью реализовать потенциал указанных выше преимуществ [11].

1.1 Анализ развития технологии вторичного вскрытия продуктивного пласта и конструкций фрезерного инструмента

Значительная часть разрабатываемых нефтяных и газовых месторождений находится в поздней стадии эксплуатации, в связи с этим перспективным методом является восстановление бездействующих или увеличение дебита работающих

скважин путём бурения бокового наклонного или горизонтального ствола из вырезанного участка обсадной эксплуатационной колонны (ОЭК). Профессор Кагарманов Н.Ф. в своем исследовании истории развития горизонтального и бокового бурения [64, 65, 101], пришел к выводу, что традиционные способы добычи нефти, которые включают в себя вертикальное и наклонное бурение скважин с применением метода заводнения, позволяют извлечь из пласта лишь 30-50 % нефти [64, 101]. В то же время, технология горизонтального бурения соответствует самым строгим требованиям по эффективности и безопасности для окружающей среды. Этот метод дает возможность существенно увеличить добычу нефти в 3-7 раз и повысить коэффициент ее извлечения до 70-80 % [134].

В истории развития бурения наклонных скважин особое место занимает турбобур. Турбобур представляет собой инновационное оборудование инженеров из России, которое открыло новые горизонты в области бурения нефтяных и газовых скважин, позволив достичь невиданных темпов их создания. Этот прорыв существенно увеличил объемы добычи углеводородов, что стало фундаментом для устойчивого экономического роста Советского Союза. Позднее, на смену турбобуру пришел винтовой забойный двигатель (ВЗД), разработанный и выпускаемый такими предприятиями, как Кунгурский и Павловский машиностроительные заводы, а также заводом синтетического каучука в Чайковском. В СССР и современной России именно с использованием гидравлических забойных двигателей пробурено подавляющее большинство нефтяных и газовых скважин, включая те, которые имели сложный профиль и являлись ключевыми для добычи углеводородного сырья [156].

Достаточно много горизонтальных многозабойных скважин (110-120 шт.) пробурено в 50-е годы, из них около половины в Башкортостане. Однако отсутствие в некоторых случаях положительных результатов объективно привело к снижению объемов бурения горизонтальных стволов. Интерес к данной теме возобновился лишь в 80-е годы. Современное состояние строительства горизонтальных скважин характеризуется бурно растущим интересом к этому

технологическому процессу во всем мире, в том числе и в развивающихся странах [59]. В 1980-1984 гг. ежегодно бурилось не более одной скважины в год, а в 1988 г. их число в мире превысило 200.

Исходя из опыта проводки нефтяных горизонтальных, разветвленных и многозабойных скважин, установлено, что все они пробурены с поверхности. Впервые в СССР разветвление скважин для увеличения притока нефти из пласта предложил в 1941 г. Тимофеев Н.С. [35]. На практике проводка горизонтальных скважин осуществлена в 1947 г. на Краснокамском месторождении нефти (Григорян А.М. и Брагин В.А.), где из основного ствола пробурены два ствола длиной 30 и 35 м [45, 121].

Более широкие эксперименты по проводке стволов начаты в 1952 г. на Карташевском месторождении. В 1952-1953 гг. пробурено пять многозабойных скважин с отклонениями от основного ствола до 300 м, при этом наибольшая длина горизонтального ствола составила 260 м [37, 39].

В марте 1957 г. пробурена многозабойная скважина 1543 на Бориславском месторождении (Прикарпатье), по различным азимутам от вертикального ствола отведены пять резко искривленных дополнительных стволов с отходами от вертикали до 120 м [35].

В 70-х годах Альметьевским УБР осуществлена проводка пяти скважин глубиной 1256-1416 м и длиной горизонтального участка 146-317 м, бурение вели турбинным способом [35].

Внедрение телеметрических систем началось в 60-х годах, а роторных управляемых систем в 90-х годах прошлого века. За время использования накоплен определенный опыт, изложенный в следующих работах [74, 132, 138, 139].

Анализ научно-технической информации показал, что нарушения проводки скважин, вызываемые различными причинами, существенно зависят от типа и состояния телеметрических и роторных управляемых систем [41, 42, 44, 132, 153, 158]. По промысловым данным из общего числа пробуренных скважин до 50 %, составляли скважины с нарушениями технологии проводки скважины.

При наклонно-направленном бурении существуют различные причины некачественной проводки скважин [153]:

- отклонение зенитного угла, азимута;
- ошибочное измерение углов датчиками телеметрической системы, меры инструмента, глубины скважины, ошибочное прогнозирование положения ствола;
- частые необоснованные корректировки ствола скважины;
- износ и отказ оборудования.

В связи с этим при строительстве скважин большое внимание уделяется вопросам своевременного определения технического состояния оборудования.

Скважинные фрезеры предназначены для фрезерования металла ОК, цементного камня при ликвидации аварий в скважине и забуривания новых столов. Фрезерование – это наиболее распространенный способ разрушения металлов в стволе скважины, основанный на резании различными режущими устройствами. Эксплуатационные и конструктивные параметры скважинного инструмента определяются назначением и условиями их работы [12]. Этим обусловлена и большая разновидность типоразмеров и конструкций. Условия, при которых работают скважинные фрезерные инструменты, зависят в основном от вида и технологии работ. При прочих равных условиях, с увеличением глубин и уменьшением диаметров скважин, условия работы инструмента резко ухудшаются. Уменьшение диаметра вызывает уменьшение габаритов инструмента, что затрудняет создание надежной конструкции скважины [133]. На Рисунке 1.1 показана классификация фрезерного инструмента для проведения ремонтно-восстановительных работ в скважине. Так как объекты фрезерования отличаются по свойствам материала, условиям их залегания, характеру расположения в скважине, геометрическим размерам, целям фрезерования, то существующая классификация достаточно обширна и включает несколько видов фрезеров.

Из проведенного анализа установлено, что на рабочую кромку в процессе фрезерования действуют внешние факторы: ударные нагрузки, высокая температура, гидроабразивы, крутильные, поперечные, продольные колебания.

При фрезеровании инструмент взаимодействует с цементом, песком, горной породой, частицами снятой стружки, обломками металла и другими объектами, которые осаждаются на забой и не выносятся на поверхность технологической жидкостью. Эти факторы оказывают на рабочую поверхность абразивное воздействие и могут приводить к отказу оборудования.

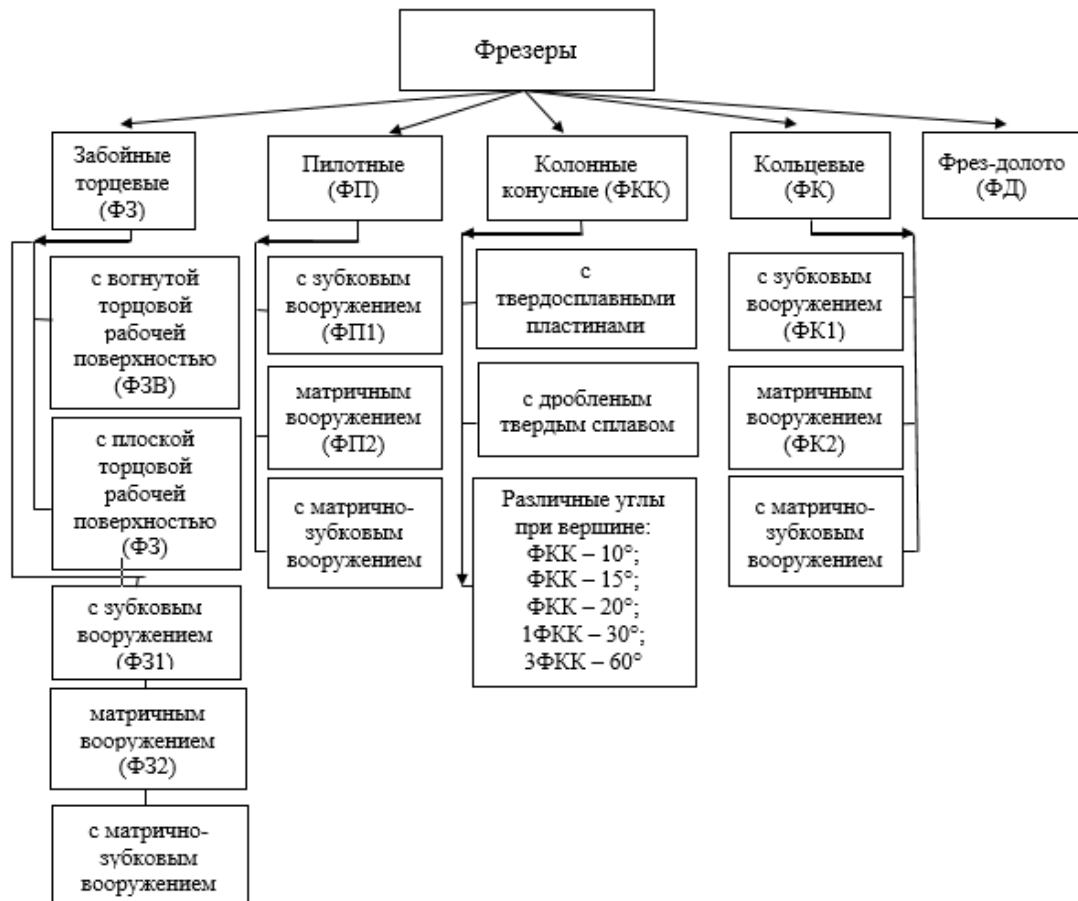


Рисунок 1.1 – Классификация фрезерного инструмента

Поиск патентной информации проводился за 2011-2023 гг. по базам данных:

- 1) Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный институт промышленной собственности» – «<https://new.fips.ru>»;
- 2) «Яндекс. Патенты», созданные при содействии Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатента) – «<https://yandex.ru/patents>»;
- 3) Европейского Патентного ведомства «European Patent Office» – «<https://www.epo.org>»;

4) авторских свидетельств и патентов Союза Советских Социалистических Республик «База патентов СССР» – «<https://patents.su>».

Поиск научно-технической информации проводился по базам данных:

- 1) научной электронной библиотеки «Elibrary» – «<https://www.elibrary.ru>»;
- 2) научной электронной библиотеки «КиберЛенинка» – «<https://cyberleninka.ru>»;
- 3) информационно-энциклопедического проекта «Рубрикон» – «<https://www.rubricon.com>».

Установлено, что наибольшее количество патентной информации приходится на совершенствование конструкции фрезеров торцевых и конусных типов, а также их вооружения (Рисунок 1.2), составляя более 60 % от всей информации.

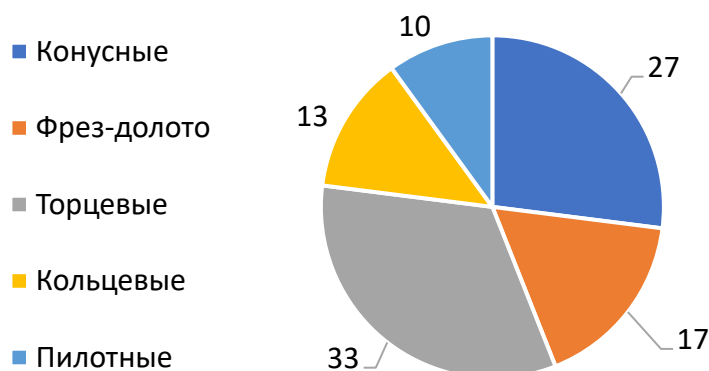


Рисунок 1.2 – Распределение патентов по типам фрезеров за период 2011-2023 гг., %

В настоящее время наиболее часто используются два метода создания бокового ствола из обсаженной эксплуатационной колонны вертикальной, наклонной или горизонтально-наклонной скважины для повышения нефтеотдачи малодебитных скважин [69]:

- вырезание участка ОК с последующим бурением бокового ствола;
- вырезание «окна» в ОК с применением клина-отклонителя и дальнейшее бурение бокового ствола.

На данный момент значительная часть разрабатываемых нефтяных и газовых месторождений находится в поздней стадии эксплуатации, поэтому перспективным методом является восстановление бездействующих или увеличение дебита работающих скважин путём бурения бокового наклонного или горизонтального ствола из вырезанного участка ОЭЖ с применением инструмента для фрезерования [157].

Технологию фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне разрабатывали и 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 [24, 29, 33, 60, 75, 80, 95, 100, 102, 104, 124, 127, 134, 151, 154].

В своих трудах Воевидко И.В. и Чудык И.И. рассматривают процесс фрезерования «окна» в ОК скважины и обосновывают математические зависимости, которые дают возможность определить величину отклоняющей силы на фрезерный инструмент и степень искривления бокового ствола скважины [27, 28].

Профессор Левинсон Л.М. в своих работах [50, 51] рассматривает существующие твердые сплавы для оснащения породоразрушающего и фрезерного инструментов, а также их усовершенствование при бурении бокового ствола. В статье [150] Левинсон Л.М. с Хасановым А.Ф. анализируют преимущества и недостатки различных методов забуривания бокового ствола. Авторами установлено, что наиболее эффективным является метод с вырезанием щелевидного «окна» в стенке ОК с помощью клина-отклонителя и дальнейшим забуриванием бокового ствола через «окно».

Ученый Мирсалаев С.Б. в своих исследованиях описывает совершенствование компоновки для вырезания «окна» в эксплуатационной колонне, которая включает комплект фрезеров-райберов и клин-отклонитель, а также технологию бурения второго ствола [93]. Обнаружено, что недостаток этой

компоновки заключается в необходимости совершать дополнительный рейс для подъёма спускного клина и спуска стартового фрезера для вырезания «окна».

Гилязов Р.М. в своих работах [34, 35, 123] анализирует и систематизирует существующие в России и за рубежом технологии бурения и заканчивания скважин с боковыми стволами, а также анализирует теоретические принципы определения характеристик цементных мостов высокой надежности, что необходимо для гарантирования выхода бурового оборудования из основного ствола скважины в точке, где предполагается фрезеровать ОК.

Ломов А.П. в своём докладе представил принцип снижения риска аварий при фрезеровании ОК с использованием раздвижных колонных фрезеров с системой аварийного возврата. Установлено, что применение этой системы предотвращает аварии и сокращает время, необходимое для устранения проблем, возникающих во время процесса фрезерования [72].

В статье Абдуллина Н.М. [8] предложены практические рекомендации по безопасному фрезерованию участка ОК в наклонно-направленных скважинах с большими зенитными углами и в горизонтальных скважинах во время строительства или капитального ремонта.

Гасанов А.П. в статье [32] описывает способы повышения эффективности работы фрезера-райбера с учетом повышения значений параметров фрезерования для ОК из высокопрочных сталей. Установлено, что с помощью моделей для каждой марки стали можно определить наибольшую удельную производительность, регулируя сочетания выбранных параметров.

В статье Шешуковой К.В. и Хайруллина А.А. рассматривается эффективность зарезки бокового ствола на примере бездействующей скважины Ямбургского месторождения. В ней авторы приходят к выводу, что эта технология позволяет вернуть в разработку скважины, которые не могли быть задействованы при обычных операциях из-за геолого-технических условий [49].

В статье [148] описывается процесс реконструкции скважины путём фрезерования «окна» в ОК и последующего бурения бокового ствола на

полупогружной плавучей буровой установке. Установлено, что проведённые работы позволили сохранить пробуренную часть ствола скважины и продлить срок эксплуатации месторождения.

В статье [14] сравниваются методы и технологии вырезания «окон» в ОК и зарезки бокового ствола из существующих скважин российских и зарубежных сервисных компаний. Авторы отмечают, что для повышения режущей способности и наилучшего разрушения горных пород необходимо улучшать конструкции фрезерного инструмента.

В статье [152] Хасанова А.Ф. и Гаттаровой М.Р. рассмотрена система «Over Head» компании ООО НПП «Буринтех», предназначенная для фрезерования «окна» в ОК. Установлено, что преимуществом данной системы является фрезерование «окна» за один рейс за счет спуска, последующего ориентирования и посадки клина-отклонителя.

В зарубежной статье [170] описываются преимущества от использования старой скважины с помощью фрезерования «окна» в ОК и последующей зарезки горизонтального ствола. Так на газовом месторождении Сулиге, северо-западе Китая этот способ значительно снизил затраты на разработку скважины, повысил продуктивность и увеличил добычу в 3-5 раз [170].

В статье [13] описана обобщённая классификация осложнений и наиболее частые причины их возникновения на примере Восточно-Сургутского месторождения. Установлено, что основные проблемы связаны со следующими причинами:

- с прихватом инструмента и обсадных труб;
- с нестабильной работой фрезерного инструмента;
- с износом оборудования технической системы.

Исходя из анализа научно-технической информации определена классификация инструментов для забуривания бокового ствола скважины. Установлено, что наибольшее количество патентной информации приходится на изменение способов и поиск новых методов фрезерования, а также на

совершенствование конструкций фрез-долот и фрезер-райберов (Рисунок 1.3), составляя более половины от всех проанализированных документов.

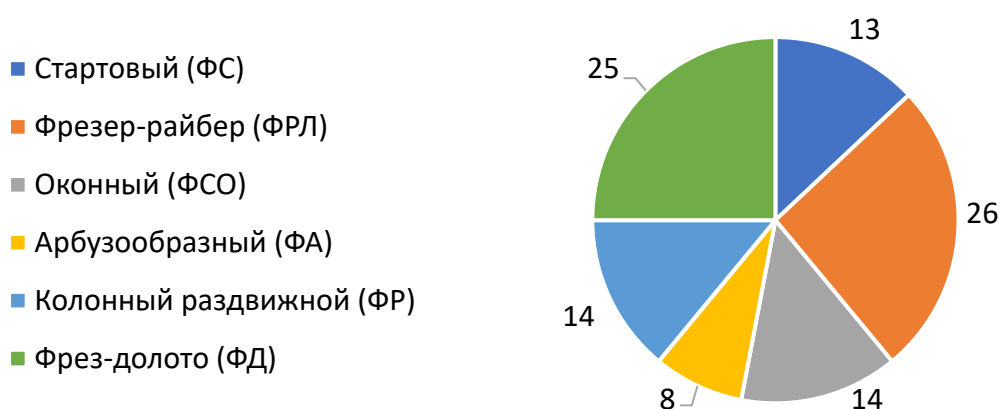


Рисунок 1.3 – Распределение патентов по видам фрезерного инструмента за период 2011-2023 гг., %

Установлено, что количество зарегистрированных патентов и научных трудов увеличивается с каждым годом, а старые конструкции постоянно совершенствуются и перерабатываются. Исходя из этого, можно сделать вывод, что разработка инновационных и усовершенствование существующих технологий и инструментов для создания «окна» в эксплуатационной колонне и последующее бурение боковых стволов, является динамично развивающимся и приоритетным направлением для восстановления заброшенных нефтедобывающих скважин, и увеличения добычи нефти на старых нефтеносных участках [157].

Разработками новых конструкций инструментов для фрезерования занимаются такие компании как: ООО НПП «Буринтех», ООО «ВНИИБТ – Буровой инструмент», ЗАО «Измерон», ООО «Фирма «Радиус-Сервис», ООО НПП «Бурсервис», ООО «Биттехника» ООО НПФ «Технология», ООО «Marlin Oil Tools», а также Halliburton Inc., Varel International Ind и другие.

В статье [174] описаны недостатки существующих методов бурения боковых стволов и технологий вторичного вскрытия продуктивных пластов. Установлено, что бурение боковых стволов и гидравлический разрыв пласта затруднительны

из-за близкого расположения газовой шапки и подстилающей воды в силу геолого-технологических причин, а применение существующих технологий вторичного вскрытия не является эффективным из-за обширной зоны проникновения фильтрата бурового раствора или заколонной циркуляции [142-144]. Определено, что разработка специалистов компании «Перфобур» и ученых Уфимского государственного нефтяного технического университета позволила создать энергоэффективный, щадящий метод бурения разветвленных каналов из обсаженной скважины по прогнозируемой траектории. Особенностью технологии, а главное её конкурентоспособностью, является возможность созданной ТС многократно входить в разветвленные каналы, для проведения гидродинамических исследования продуктивного пласта, глубоко проникающей соляно-кислотной обработки, обсадки пробуренных каналов специальными фильтрами, или установки в них специальных устройств при необходимости. Определено, что эффективное фрезерование ОК и бурение сети разветвленных каналов сверхмалого диаметра и радиуса кривизны стало возможно благодаря разработанной технической системе «Перфобур» в состав которой входят универсальные малогабаритные секционные ВЗД [75, 76, 79, 107, 135, 136, 145]. Результаты аналитических и экспериментальных исследований, в том числе и промысловых работ, опубликованы в многочисленных статьях [77, 81, 84, 116, 118, 141, 142, 144, 167, 169, 171, 172].

Первые поколения технической системы «Перфобур» проходили испытания на стенде, где проводилось фрезерование образцов ОК, и дальнейшее бурение песчано-цементного блока. В результате испытаний установлена надежность и работоспособность основных компонентов технической системы, и протестированы различные типы породоразрушающих и фрезерных инструментов [80, 81, 83, 86, 141, 145]. Определено, что с помощью данной технической системы устанавливается качественная гидродинамическая связь между пластом и скважиной без ущерба для проницаемости [78, 84, 135].

Серийный скважинный комплекс ТС «Перфобур» для фрезерования и бурения, модульно размещается в специальных корпусах и включает: твердосплавные фрезы специального профиля, долота типа PDC диаметром 69...70 мм, центраторы типа ГЦ диаметром 66...68 мм, малогабаритные ВЗД, разработанные по техническому заданию компании «Перфобур»: Д1-54М; ДОТ-54 РС.800; 2Д-42.9/10; 2Д-43.5/6.42; 2ДО-43.NGT.5/6.3; ДОТ-49РС.800, выполненные одно- и многосекционными со специальными рабочими органами [136]. Технические задания на ВЗД разработаны после аналитического обобщения теории циклоидального зацепления и методов торцового профилирования рабочих органов с выбором оптимальных сочетаний коэффициентов зацепления, специальной шпиндельной секцией и гибкими межкорпусными и межроторными сочленениями [116, 171, 172]. Такая компоновка для бурения, с определенными изгибными и крутильными жесткостями базовых элементов бурильной колонны, подбиралась аналитически и корректировалась по данным многочисленных стендовых, а затем и промысловых испытаний, что способствовало получению искомого радиуса кривизны до 5...7 м. При этом траектория каналов контролируется и регистрируется специальными инклинометрами, и получается схожей с дугой окружности, в которую эффективно вписывается компоновка ТС [77, 167].

Наиболее эффективным и универсальным инструментом для разбуривания специальным малогабаритным ВЗД цементных мостов, песчаных пробок и технологической оснастки является фрез, который подбирается исходя из индивидуальных характеристик скважины и технического задания [136]:

- от диаметра эксплуатационной колонны от 140 до 178 мм (дополнительно проводятся работы с колоннами диаметров 114 и 245 мм);
- от группы прочности колонны (Д, К, Е, Л, М, Р, Т);
- от содержания вредных примесей (H_2S , CO_2 , SO_2 , HCl и др.);
- от состава и количества легирующих элементов.

В ходе работы установлено, что при фрезеровании «окна» в ОК состояние технической системы во многом определяется безотказностью винтового забойного двигателя и фрезерного инструмента [156]. Известна информация, что

среди возможных осложнений при работе технической системы «Перфобур» следует выделить дифференциальные прихваты и прихваты вследствие заклинивания в местах деформирования поперечного сечения перфорационного канала [122]. Компания ООО «Перфобур» применяет комплекс мер для предотвращения риска дифференциального прихвата [122]:

- 1) обеспечение необходимой реологии бурового раствора;
- 2) использование специальных осцилляторов в тех зонах, где возможны осложнения;
- 3) применение специальных компоновок нижней части бурильной колонны с трубами различной частотной характеристики и забойным автоматом подачи долота;
- 4) контроль процесса бурения при вскрытии продуктивных пластов [128, 167].

В настоящий момент времени компания работает над тем, чтобы кроме фрезерования «окна», технологически можно было продолжать непосредственное бурение, и для этого совершенствуют не только сами фрезерные инструменты, но и узлы технической системы [80, 83]. В процессе эксплуатации возникает необходимость своевременного мониторинга и оценки технического состояния компоновки, в том числе возможность прогнозирования подклинивания и заклинивания специального малогабаритного ВЗД.

1.2 Вероятностно-статистическая оценка технического состояния оборудования

Установлено, что техническое состояние оборудования в процессе эксплуатации можно контролировать с помощью математической обработки временных рядов случайных колебаний технологических параметров процесса. Эти параметры представлены как стационарные, эргодичные случайные процессы, которые анализируются с использованием спектрально-корреляционных и других методов анализа [26, 83, 157].

Для удобства анализа данные временных рядов измерений технологических параметров в процессе эксплуатации необходимо представить в виде последовательности случайных величин, что позволит использовать вероятностные и спектральные методы анализа, которые являются универсальными и применимыми к данным различной природы [24, 90, 166].

Процедура получения или сбора данных в значительной степени определяется изучаемым явлением и целями, которые достигаются обработкой [175]. Первым шагом при сборе данных является линейное преобразование исследуемого процесса с помощью специальных датчиков в электрическую форму для дальнейшей оцифровки данных. Затем данные преобразуются в цифровую форму в виде временных рядов и проводится их детальный анализ [90, 112].

Таким образом, общую схему анализа данных можно условно разбить на три этапа [26, 166]:

- 1) подготовка данных для численного анализа;
- 2) оценка основных свойств реализаций;
- 3) анализ данных.

Основным элементом компоновочной части технической системы «Перфобур» для перфорации каналов малого диаметра является специальный малогабаритный ВЗД. Основные узлы двигателя: секции двигательной и секции шпинделя-отклонителя, которые соединяются между собой с помощью метрических резьб [156].

В работах Молодило В.И. описан выбор режима бурения с помощью ВЗД по давлению на поверхности, который позволяет: автоматизировать процесс бурения [3, 94], определить причину снижения скорости, техническое состояние ВЗД [3] и время предельного износа долота. Установлено, что во время работы ВЗД возникают колебания давления технологической жидкости и осевой нагрузки, при этом анализ протекающих при бурении скважин физических процессов, специфика и условия работы глубинного оборудования показывают, что эти явления часто носят непредсказуемый, случайный характер.

Изучение этих сложных явлений, наряду с широко распространенными детерминированными методами, требует и вероятностного подхода, нахождение вероятностных законов, присущих случайным событиям [89]. Колебательные процессы в процессе бурения носят как положительный характер, связанный с разрушением горной породы, выносом ее на поверхность и безусловно являются информативными с выделением этой информации на устье скважины, так и отрицательный, оказывающий влияние на снижение показателей надежности оборудования, эффективности его применения по назначению, появлению внезапных отказов [30].

Колебаниям, возникающим в процессе эксплуатации, определяют особую роль при оценке технического состояния глубинного оборудования. В следствии этого с каждым годом возрастает интерес к данной теме и ведутся дальнейшие исследования [29]. Разрабатываются различные способы и подходы к расшифровке получаемой информации, при этом интерес представляет исследования контроля забойных параметров по вибрациям, измеренных на устье скважины. В этом случае, долото или фрез является естественным источником колебаний. Бурильная колонна представляет канал связи между забоем и устьем скважины. Колебания технологических параметров, сопровождающих процесс эксплуатации, могут быть выражены в изменениях их спектральной характеристики и учтены в алгоритмах косвенной обработки измеряемых сигналов [125].

Визуальное изучение полученных реализаций колебаний осевой нагрузки на долото или фрез и давления технологической жидкости показали, что эти колебания являются не только гармоническими и непериодическими, но ещё имеют и случайный характер, а полученные закономерности имеют статистический смысл. Возможность многократного измерения случайных колебаний технологических параметров процесса бурения при одновременной оценке технического состояния глубинного бурового оборудования позволяет применять методы теории вероятности и математической статистики.

Использование случайных процессов, при правильной расшифровке, позволяет оценивать техническое состояние глубинного оборудования [79].

Вопросами изучения использования вероятностно-статистической оценки состояния оборудования в бурении и добыче 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., Сызранцев В.Н., Хасанов М.М., Шайдаков В.В., Юнин Е.К., Ямалиев В.У. и многие другие исследователи [19, 31, 38, 54, 55, 57, 71, 125, 159].

Различные критерии оценки технического состояния глубинного бурового оборудования, предложенные многими отечественными и зарубежными исследователями, ввиду непрерывного изменения условий бурения не дали однозначного ответа на вопрос о рациональном времени работы глубинного оборудования, и поэтому на практике используют как можно больше критериев. С этой точки зрения, рассмотрим несколько подходов при обработке забойной информации с целью контроля состояния оборудования без проведения активного эксперимента [4, 18, 125, 166].

Существует множество различных диагностических критериев для оценки технического состояния глубинного оборудования в процессе эксплуатации, предложенных разными авторами, но не каждый из них, является основным, при их использовании должно выполняться условие независимости друг от друга [87]. Для косвенной оценки технического состояния оборудования в процессе эксплуатации используются различные критерии, которые дополняют другие методы косвенной оценки [68].

1.2.1 Коэффициент Джини

К группе критериев для косвенной оценки технического состояния инструмента относится критерий диагностирования, основанный на применении

коэффициента Джини, используемого в экономике. В процессе работы по этому коэффициенту устанавливается взаимосвязь между случайными колебаниями измеряемых технологических параметров и изменениями технического состояния инструмента, что позволяет принимать оперативные решения по управлению процессом бурения [38, 62]. Определение коэффициента Джини основано на построении кривой Лоренца, или линии распределения [111]. Установлено, что минимальный износ инструмента и, соответственно, его максимальная работоспособность соответствуют максимальным значениям критериев работоспособности [111, 115].

Недостатками способа является то, что описанный критерий Джини, являющийся универсальным измерителем дифференциации значений, не позволяет идентифицировать в какой именно момент времени происходит максимальный износ оборудования. По распределению коэффициента Джини по мере углубления скважины, затруднительно выявить взаимосвязь между коэффициентом и разрушением объекта управления – долота [120].

1.2.2 Энтропийный анализ

Анализ изменения энтропии является мерой неопределенности случайной величины, в качестве которой могут быть использованы колебания технологических параметров различных процессов. В промышленных условиях достаточно сложно уловить время перехода объекта с одного технического состояния в другое [90, 115]. В связи с этим в работах [112, 115] предложено использовать сравнение значений энтропии, определяемых в текущий момент процесса бурения и энтропией эталонного состояния, т.е. в начальный момент бурения – при неизношенном инструменте. Путем накопления статистической информации для соотношения «Критерий по энтропии – техническое состояние инструмента» возможно установление значений перехода из рабочего состояния в аварийное [26, 115].

Недостатком данного критерия является: допущение, что переход одного состояния в другое всегда обусловлен изменением технического состояния исследуемого объекта, а соответственно, точности вычислений недостаточно, для определения текущего состояния объекта.

1.2.3 Коэффициент вариации и дисперсия

Коэффициент вариации используется для более полной характеристики динамичности процесса [26, 137]. Для случайного процесса коэффициент вариации определяется как отношение стандарта к математическому ожиданию процесса. В отдельных случаях рекомендуют использовать коэффициент вариации в качестве условной границы для разделения процессов на детерминированные и случайные [4]. В известном авторском свидетельстве [4] предлагается сравнивать отношение коэффициентов вариации в процессе бурения к коэффициенту вариации в начале бурения с эталонным значением, по которому можно диагностировать техническое состояние: превышение текущего значения над эталонным значением говорит о предельном состоянии.

Дисперсия необходима для понимания, насколько велики отклонения случайной величины от ее математического ожидания, так как разброс значений этих величин относительно их математического ожидания может быть неодинаков [5, 91]. Дисперсия достаточно длинного временного ряда значений технологических параметров процесса бурения рассматривается в качестве критерия оценки технического состояния породоразрушающего инструмента [5, 68, 115]. Полученное значение дисперсии соотносят фактическому износу породоразрушающего инструмента по вооружению и опоре [26, 177].

Недостатками данных критериев оценки технического состояния являются: низкая помехоустойчивость к воздействию внешних случайных факторов, а отсюда и не достаточная точность оценки технического состояния породоразрушающего инструмента в процессе эксплуатации, и, соответственно, низкая отработка

инструмента допускающая возможность аварийного состояния всей технической системы.

1.2.4 Показатель Херста

Для более глубокого понимания процессов, происходящих с диагностируемым оборудованием, при работе которого возникает вибрация, можно использовать фрактальные характеристики одномерных временных рядов – размерность Хаусдорфа и показатель Херста [70, 90, 91]. Показатель Херста имеет широкое применение при анализе и классификации достаточно длинных временных рядов в разных областях. Он может отличить случайный ряд от неслучайного: если ряд случайный, размах будет увеличиваться пропорционально корню квадратному из времени. Для калибровки временных измерений Херст ввел безразмерное отношение: деления размаха на стандартное отклонение наблюдений [70, 92, 117]. Данный способ анализа называется методом нормированного размаха.

Показатель Херста (He) может изменяться в диапазоне от 0 до 1 и имеет три различных классификации [70, 117]:

- $He = 0,5$ – указывает на случайный ряд, события случайны и не коррелированы;
- $0 \leq He < 0,5$ – данный диапазон соответствует гармоническому сигналу;
- $0,5 < He \leq 1$ – соответствует возрастающему или убывающему ряду.

Во многих работах [90-92] отмечается, что переход сложной технической системы к хаотическому изменению режима служит признаком существования дефекта оборудования, что говорит об актуальности использования показателя Херста для оценки технического состояния оборудования.

Недостатками данного способа определения технического состояния системы являются: сложная процедура определения критерия работоспособности, так как переход сложной технической системы к хаотическому изменению режима

не всегда служит признаком существования дефекта оборудования, а также высокое влияние случайных факторов на полученные результаты [120].

1.2.5 Выбросы случайных колебаний

Из обширного комплекса проблем теории случайных процессов большое значение имеют задачи, связанные с выбросами значений случайного процесса за некоторый уровень [62]. Реализация случайного процесса в виде колебаний технологических параметров в процессе бурения скважин может несколько раз пересекать некоторый фиксированный уровень, что принято характеризовать как выбросы случайного процесса за данный уровень [63, 109]. Число выбросов можно вычислить, оценив спектральные функции перемещения и скорости, и соответствующие им дисперсии. Другой способ определения числа выбросов связан с использованием корреляционной функции случайного процесса [30, 62].

Выявленные недостатки данного способа: непредсказуемость значений самого высокого уровня, за который имеет место хотя бы один выброс, отличие значений параметров для корреляционной функции и спектральной плотности, невозможность поправок в расчете на сложные условия эксплуатации оборудования.

1.2.6 Корреляционная размерность

Методы количественного анализа хаотического колебания могут быть использованы для идентификации состояний рассматриваемых объектов управления, например, путем вычисления корреляционной размерности [26, 92]. Величина корреляционной размерности является мерой упорядоченности движения и в качестве таковой может служить диагностическим критерием, определяющим состояние изучаемых объектов управления [165]. На этой основе разработан способ оценки состояния долота в процессе эксплуатации по

изменению корреляционной размерности колебаний давления рабочей жидкости [6].

Установлены основные недостатки этого способа: теоретическое обоснование только для бесконечных и не зашумлённых хаотических процессов, а также трудоёмкость обработки больших объёмов экспериментальных данных и соответственно низкая точность оценки технического состояния долота в процессе эксплуатации.

1.2.7 Спектральный анализ

Спектральный анализ для определения работоспособного состояния оборудования включает в себя периодическое определение энергетического спектра в области сверхнизких частот вращающего момента на инструменте [115, 163]. При этом за критерий работоспособности инструмента принимают отношение площадей энергетических спектров [2, 61]. В другом патенте [1] описан способ, в котором используют оценку спектра частот колебательных процессов, с измерением пульсации давления промывочной жидкости и преобразованием ее в спектр колебаний давления. За критерий износа инструмента принимается ширина полосы нормированной спектральной плотности, а предельный износ характеризуется полным отсутствием преобладающей частоты [115].

Установленные недостатки: сложности с выделением определённого сигнала из общего спектра, зашумление или затухание результирующего сигнала. Поэтому методы, основанные на спектральном анализе, не позволяют производить всесторонний анализ вибросигнала, что приводит к общим характерным погрешностям при проведении вибродиагностических исследований.

1.2.8 Фрактальный анализ

Фрактальный анализ для определения работоспособности инструмента включает в себя измерение колебаний системы и определение эталонных значений, где, вычисляются фрактальные размерности по построенным фазовым кривым [114]. Полученные значения необходимо сравнить с эталонными значениями критериев для максимально изношенного долота [114].

Недостатки данного анализа: сложная задача описания дефектов, требующая ввода упрощающих моделей и других допущений, а также сложность в определении значений фрактальных размерностей.

1.2.9 Рекуррентный анализ

Реализация отражения эволюции динамической системы, как правило, формализуется в фазовую траекторию системы – пространство, в котором координатами служат компоненты состояний [165]. Свойство рекуррентности состояний характеризуется прохождением позднего участка траектории в фазовом пространстве достаточно близко к предыдущему, является фундаментальным свойством детерминированных динамических систем [165]. Применение рекуррентного анализа к задаче сравнительного анализа временных рядов сводится к построению кросс-рекуррентной диаграммы на основании наблюдений двух и более временных рядов. Сравнительный анализ рекуррентных диаграмм с получением диаграмм различий, восстановленных на основании временных рядов, позволил выявлять отклонения в работе системы в целом с последующей обработкой выделенных значений [165].

Недостатки данного метода: систематические погрешности из-за неточности учёта наложения дифракционных линий разных фаз, а также сложная процедура определения критерия работоспособности.

1.2.10 Вейвлет-анализ

Метод позволяющий обобщить данные спектрального анализа и являющийся интегральной функцией. Вейвлет-преобразование сигнала состоит в его разложении по некоторому базису [113]. В качестве базисной выбирается хорошо локализованная и по времени, и по частоте функция, обладающая рядом характерных признаков [113, 152]. Вейвлет-преобразование одномерных сигналов, измеренных в начале и в процессе бурения, производят с определением их масштабно-временной развертки и значений полной энергии [177]. В процессе бурения полученные значения необходимо сравнивать с эталонными, чтобы дать рекомендации по повышению точности оценки технического состояния инструмента.

Выявлены следующие недостатки анализа: возможное возникновение амплитудных искажений, возникновение высоких погрешностей из-за различия масштабов и частот.

1.2.11 Метод Байеса

Теорема Байеса, основанная на одноименном методе – это основная теорема теории вероятностей, которая позволяет определить вероятность того, что произошло какое-либо событие при наличии лишь косвенных тому подтверждений, которые могут быть неточны [15, 62, 162]. Область применения матрицы ограничивается пределами обработанного статистического ряда для конкретных условий работы и технических объектов [26, 96]. Учитывая, что одной из важных задач при оптимизации диагностирования является использования критериев с наибольшей диагностической ценностью, то ценность критерия определяется информацией, которая вносится критерием в систему состояния объекта диагностирования [96, 164].

Метод Байеса имеет недостатки: большой объем предварительной информации, «угнетение» редко встречающихся диагнозов. Однако в случаях,

когда объем статистических данных позволяет применить метод Байеса, его целесообразно использовать как один из наиболее надежных и эффективных методов [126, 162].

Таким образом, рассмотрев известные критерии косвенной оценки технического состояния глубинного оборудования, установлено, что их применение не дает универсальных рекомендаций о рациональном времени.

Выводы по первой главе

1 Проведен литературный обзор и патентный анализ развития конструкций фрезерного инструмента, установлено, что разработка нового и совершенствование имеющегося инструмента для фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне и последующее бурение наклонно-направленных скважин является развивающимся и приоритетным направлением для восстановления заброшенных скважин и повышения нефтеотдачи действующих месторождений.

2 Установлено, что во время испытаний фрезерного инструмента возникают колебания осевой нагрузки и давления технологической жидкости, которые показывают, что эти колебания являются не только гармоническими и непериодическими, но ещё имеют и случайный характер, а полученные закономерности имеют статистический смысл. Возможность многократного измерения случайных колебаний технологических параметров процесса при одновременной оценке технического состояния глубинного оборудования позволяет применять методы теории вероятности и математической статистики.

3 Рассмотрены известные критерии косвенной оценки технического состояния оборудования, определено, что их применение не дает универсальных рекомендаций о рациональном времени работы оборудования. Установлено, что актуальным направлением является разработка нового критерия диагностирования оборудования для последующего создания автоматизированной системы оценки его технического состояния в процессе фрезерования «окна» в ОК.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ СПЕЦИАЛЬНЫМ ВЗД И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1 Теоретические исследования математической модели

Существуют различные математические модели для описания процесса фрезерования в машиностроении. В работах [23, 73] определено, что существует проблема аналитического описания процесса фрезерования древесины. Авторами разработаны математические модели с учетом характеристик обрабатываемой детали, скорости резания, режимов работы, специфики разрушения древесины и конструктивно-геометрических параметров инструмента. Так как данные модели построены для древесины, которая является материалом со сложной слоисто-волокнистой и капиллярно-пористой структурой, они не подходят для описания процесса фрезерования металла.

В работах [52, 53] установлено, что при математическом моделировании процессов фрезерования металлов существуют сложности при описании взаимодействия резца с обрабатываемой деталью. Тарасяном В.С. предложен метод для анализа устойчивости фрезерования при различных параметрах режима работы с построением проекций областей асимптотической устойчивости [140].

В диссертации [40] описана математическая модель, основанная на зависимости вибрации от износа режущего инструмента и основных параметров процесса фрезерования металла. Для построения модели использованы некоторые допущения, например, что вибрации режущего инструмента нужно рассматривать как гармонические колебания, что изменение главной составляющей силы резания является основной причиной изменения вибрации; также необходимо учитывать касательную составляющую силы резания, силу трения по задней поверхности фрезы.

Модель расчета сил резания основана на модели, предложенной Свиным В.М. [130]. Одним из её существенных недостатков является способ расчета параметров срезаемого слоя, при этом установлено, что модель износа инструмента включает в себя взаимосвязь периода стойкости фрезы и режимов резания: минутной подачи и скорости резания.

В статье [22] авторами Бородкиным Н.Н. и Тимохиной В.Ю. описана математическая модель развертывания. Установлена основная сложность при изучении динамики процесса фрезерования, а именно что при математическом моделировании необходимо рассматривать нелинейные уравнения с периодически изменяющимися коэффициентами, которые обусловлены прерывистостью процесса резания каждым зубом фрезы.

Не смотря на большое количество трудов по фрезерованию металла на металлорежущих станках, ни одна из предложенных математических моделей не может быть использована для описания процесса фрезерования «окна» в ОК на большом расстоянии в глубине от устья скважины. Это связано с тем, что при использовании скважинного фрезерного инструмента существуют следующие особенности:

- отсутствие возможности обеспечения периодической заточки режущих элементов;
- сложность контроля технического состояния фрезы и ВЗД в процессе работы;
- неравномерность охлаждения режущей кромки;
- работа в осложнённых скважинных условиях, с учетом различных видов нагрузок;
- сложная процедура определения точности траектории движения инструмента при фрезеровании.

Известна математическая модель компоновки буровой колонны технической системы «Перфобур» для бурения карбонатных и терригенных коллекторов [74, 135, 172], которая основана на феноменологической модели

колебательной системы динамически возмущенной нижней части бурильной колонны перфобура с гидронагружателем – демпфером и уравнении движения системы на основании закона Ньютона [74, 135, 168].

Исходя из указанных особенностей необходимо разработать математическую модель процесса фрезерования «окна» в стальной ОК с помощью компоновки со специальным малогабаритным ВЗД, представляющим собой героторный механизм рабочих органов силовых секций, обеспечивающих планетарное движение ротора относительно статора, при преобразовании энергии подачи технологической жидкости во вращательное движение ротора, с передачей вращения через карданное соединение, валу шпиндельной секции, к которому прикреплена фреза, то есть является вибрационной машиной [16, 110, 136].

Анализ промышленной экспериментальной информации показывает, что случайные колебания, возникающие в ТС, часто имеют детерминированный характер. Они возникают из-за самой ТС и поэтому являются важным источником информации о ее внутренних характеристиках [92]. В частности, о состоянии объекта можно судить по оценкам размерности странного аттрактора, полученным известными методами теории динамических систем: фрактальной размерностью по Колмогорову-Хаусдорфу, размерностью Ляпунова, корреляционной размерностью, информационной размерностью и другими [36, 47].

Известно, что для разных видов технологических операций, выполняемых вибрационными двигателями, возможно использование того или иного типа движения материала в среде [20]. В частности, для снятия стружки металла при фрезеровании обсадной колонны подходит циркуляционный тип движения [147].

В работе использовалась модель Лоренца, которая позволяет изучать тип движения и анализировать сложные динамические системы, характеризующиеся нелинейностью, хаотичностью и чувствительностью к начальным условиям [92]. Это делает её подходящей для моделирования движения металлической стружки в потоке технологической жидкости при фрезеровании ОК. 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. Модель Лоренца представляет собой систему из трех нелинейных уравнений (2.1) [149, 173]:

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma y - \beta x, \\ \dot{y} = rx - y - xz, \\ \dot{z} = -bz + xy. \end{cases} \quad (2.1)$$

Параметры модели Лоренца функционально могут быть связаны с интенсивностью вибрации исходя из частоты вращения фрезерного инструмента, с конструкцией и характеристиками конкретного ВЗД, с физико-механическими свойствами материала ОК:

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

где $\omega_{\text{ВЗД}}$ – частота вращения ВЗД, 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.

В работе Бутенина Н. В., Неймарка Ю. И. и Фуфаева Н. А. описан частный случай применения системы уравнений Лоренца (1) [25]. Принимая, что параметр системы $b = 1$, циркуляция движения смеси «стружка-жидкости» в обсадной трубе, рассматривается как конвективное течение между двумя плоскостями: стенкой обсадной трубы и клином-отклонителем, подогреваемое снизу от контакта с фрезерным инструментом.

Из системы уравнений (2.1), установлено, что скорость фрезерования «окна» в обсадной колонне определяется уравнением (2.2):

$$\frac{dx}{dt} = \sigma y - \sigma x. \quad (2.2)$$

Следовательно, ускорение при фрезеровании «окна» в обсадной колонне будет определяться уравнением (2.3):

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \sigma \frac{dy}{dt} - \sigma \frac{dx}{dt}. \quad (2.3)$$

Перемещение фрезерного инструмента при фрезеровании обсадной колонны определяется по уравнению (2.4):

$$\int_0^{x_1} dx = \int_0^{t_1} (\sigma y - \sigma x) dt. \quad (2.4)$$

Преобразуем систему уравнений (2.1) для получения критериев подобия по известным уравнениям исследуемых процессов, необходимо выполнить ряд преобразований исходных уравнений, в соответствии с которым все члены уравнения имеют одинаковую размерность.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} - \sigma y + \sigma x = 0, \\ \frac{dy}{dt} - rx + y + xz = 0, \\ \frac{dz}{dt} + bz - xy = 0. \end{cases}$$

Установлено, что исходная система уравнений, не имеет одинаковой размерности, исходя из этого необходимо выразить параметры модели σ, r, b :

$$\begin{cases} \sigma = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{1}{(y-x)}, \\ r = \left(\frac{dy}{dt} + y + xz \right) \frac{1}{x}, \\ b = -\left(\frac{dz}{dt} - xy \right) \cdot \frac{1}{z}. \end{cases}$$

Опустив символы дифференцирования, получим вспомогательные критерии:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{x}{t} \cdot \frac{1}{(y-x)}, \\ C_2 = \frac{y}{tx} + \frac{y}{x} + z, \\ C_3 = \frac{xy}{z} - \frac{1}{t}. \end{cases}$$

Для обеспечения одинаковой размерности с помощью полученных уравнений, преобразуем систему, чтобы получить критерии подобия параметров системы (2.1):

$$\begin{cases} K_1 = \sigma \cdot \frac{t}{x} \cdot \frac{(y-x)}{t}, \\ K_2 = rx \frac{t}{y} - t + \frac{xzt}{y}, \\ K_3 = 1 + b \cdot t - \frac{xyt}{z}. \end{cases} \quad (2.5)$$

В результате получим критерии подобия системы при соблюдении размерности параметров модели: $\sigma \left[\frac{1}{c} \right], r \left[\frac{1}{c} + 1 + m \right], b \left[m - \frac{1}{c} \right]$ [88].

Для удобства, однозначности и точности расчета необходимо выразить соответствующие параметры исследуемой модели через расчетные значения, причем необходимо выразить именно те параметры, которые не входят в множители других критериев подобия – в данном случае, это переменные σ, r, b (в противном случае усложняется подбор и присутствует неопределенность).

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\frac{dx}{dt} \cdot x}{(y-x)}, \\ r = \frac{\frac{dy}{dt} \cdot y + t \cdot y + x \cdot z \cdot t}{xt}, \\ b = \frac{\frac{dz}{dt} - 1 + \frac{xyt}{z}}{t}. \end{cases}$$

Полученные 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. Учитывая безразмерность полученных величин, воспользуемся параметрами классической системы Лоренца [173].

Движение динамических систем для аналитических исследований удобно представлять в графическом виде. Устойчивость процесса фрезерования хорошо определяется типом движения стружки в жидкой среде и обуславливается 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 [147].

Найдем стационарные точки системы (2.1), для этого приравняем производные к нулю [149]:

$$\begin{cases} 0 = -\sigma x + \beta y, \\ 0 = rx - y - xz, \\ 0 = xy - bz. \end{cases}$$

Решение полученной системы из трех алгебраических уравнений проводится по методике, описанное в различных работах [44, 140, 163]. Первое уравнение дает $y = x$. Второе уравнение преобразуется в выражение: $x(r - 1 - z) = 0$. Здесь возможны два случая: $x = 0$ и $z = r - 1$. Таким образом, первая стационарная точка имеет координаты $\{x = 0, y = 0, z = 0\}$.

Второй случай нам дает две стационарные точки вида:

$$\{x = \pm\sqrt{b(r-1)}; y = \pm\sqrt{b(r-1)}, z = r-1\}.$$

Таким образом, система (1) имеет три особые точки [149]:

$$P_1 = (\sqrt{b(r-1)}; \sqrt{b(r-1)}; r-1);$$

$$P_2 = (-\sqrt{b(r-1)}; -\sqrt{b(r-1)}; r-1);$$

$$P_3 = (0; 0; 0).$$

При интерпретации полученных результатов для фрезерования «окна» в ОК, примем, что r характеризует энергетический параметр работы системы «ВЗД-ФИ» на различных этапах режима работы: холостом, рабочем и тормозном, и определяется на испытательном стенде. При исследовании на стенде запуск двигателя происходит в холостом режиме, с установленным расходом и перепадом давления технологической жидкости. Примем, что граничное значение r равно 1, тогда:

- если $r < 1$, то система Лоренца имеет единственную стационарную точку P_3 с координатами $(0, 0, 0)$. В рамках модели фрезерования «окна» ОК с помощью ВЗД это может значит, техническая система отключена;

- если значение параметра r становится больше единицы ($r > 1$), то появляются еще две точки P_1 и P_2 . То есть, как только увеличивается энергетический параметр работы системы, ВЗД и фрезерный инструмент начинают вращаться с последующим снятием металлической стружки обсадной трубы.

Для удовлетворительной работы технической системы, примем, что в момент фрезерования «окна» в обсадной колонне значение параметра r всегда больше 1.

Полученная форма профрезерованного «окна» в ОК позволяет утверждать, что ее поперечный размер равен выфрезерованному сегменту, а высота – её

толщине (Рисунок 2.1). В качестве примера рассмотрим процесс фрезерования «окна» в ОК диаметром 146 мм, толщиной стенки – 8 мм и группой прочности – Д.

Исходные данные для расчета:

- 1) средняя скорость фрезерования, м/с; $u_{\text{ср}} = 0,1565 \text{ см/мин} = 0,0000261 \text{ м/с}$;
- 2) средняя осевая нагрузка на фрезерный инструмент во время испытания на стенде, Н; $F_{\text{ср}} = 2145 \text{ Н}$;
- 3) плотность материала стальной обсадной колонны, кг/м³; $\rho = 7860 \text{ кг/м}^3$;
- 4) общее время процесса фрезерования «окна» в обсадной колонне, с;
 $t = 438 \text{ мин} = 26280 \text{ с}$.

Объем сегмента выфрезерованного «окна» рассчитаем по формуле (2.6):

$$V_{\text{сег}} = \pi \cdot s \cdot O_{\text{д}} \cdot o_{\text{к}}, \quad (2.6)$$

где $V_{\text{сег}}$ – объем сегмента «окна» в обсадной колонне, м³;

s – путь фрезерного инструмента, пройденный во время фрезерования обсадной колонны, м; $s = 0,65 \text{ м}$;

$O_{\text{д}}$ – длинная полуось сегмента, м; $O_{\text{д}} = 0,00375 \text{ м}$;

$o_{\text{к}}$ – короткая полуось, м; $o_{\text{к}} = 0,00300 \text{ м}$.

С помощью моделирования процесса фрезерования «окна» в обсадной трубе в программном комплексе Компас-3D было получено значение объема выфрезерованного металла (Рисунок 2.1).

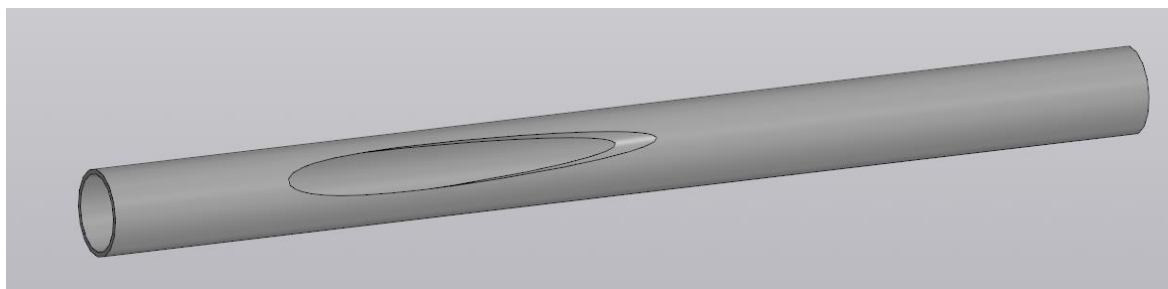


Рисунок 2.1 – Смоделированное «окно» в обсадной колонне

«Окно», полученное при фрезеровании обсадной трубы на стенде компании ООО «Перфобур» показано на Рисунок 2.2.



Рисунок 2.2 – Четыре «окна», полученные при фрезеровании обсадной трубы на стенде, каждое окно длиной 0,65 м

Полученный объем выфрезерованного «окна» равен $V_{\text{сег}} = 0,00034851 \text{ м}^3$. При этом масса отфрезерованного металла m вычисляется по формуле (2.7):

$$m = V_{\text{сег}} \cdot \rho = 0,00034851 \cdot 7861 = 2,739 \text{ кг.} \quad (2.7)$$

Стабильность процесса фрезерования ОК зависит от состава и технического состояния компоновки, качества фрезерного инструмента, а также от стабильности величин осевой нагрузки и крутящего момента, передаваемых на инструмент.

Расчеты по уравнениям модели Лоренца для фрезерования «окна» в ОК без использования гидравлического нагрузжателя в составе ТС, показали, что при частоте вращения ВЗД $\omega_{\text{ВЗД}} = 23 \text{ рад/с}$, поперечной площади слоя выфрезерованного сегмента $S_{\text{мет}} = 0,1056 \text{ м}^2$, толщине стенки $h = 0,008 \text{ м}$, средней осевой нагрузке на фрезерный инструмент $F = 2145 \text{ Н}$, крутящем моменте на валу двигателя $M = 252 \text{ Н·м}$, перепаде давления технологической жидкости $P = 4200000 \text{ Па}$, расходе технологической жидкости $Q = 3 \text{ л/с}$, общем времени фрезерования $t = 26280 \text{ с}$, начальных условиях движения $x(0) = 0$; $y(0) = 1$; $z(0) = 0,05$; $\sigma = 10$; $r = 28$; $b = 2,6$ отображающая точка описывает цикл, показанный на Рисунке 2.3 [88].

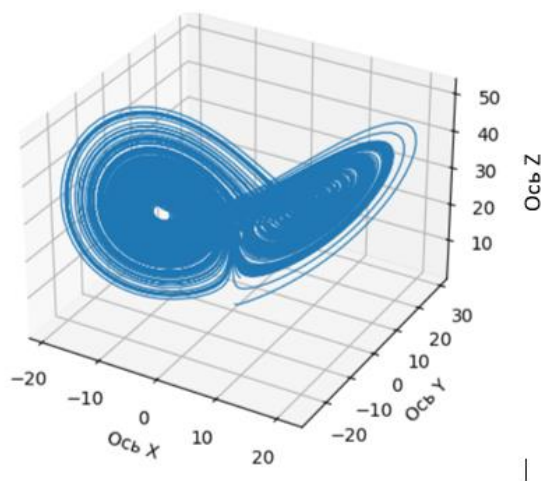


Рисунок 2.3 – Странный аттрактор Лоренца для динамической системы в процессе фрезерования обсадной колонны без гидравлического нагружателя

В этом случае в качестве фазовой траектории получен странный аттрактор Лоренца, который представляет фрактальное множество, исходя из этого можно утверждать, что в детерминированной системе возникает хаос (Рисунок 2.3) [48], следовательно, осевая нагрузка на инструмент становится неуправляемой, скорость фрезерования – нестабильной, что может приводить к отказу всей ТС.

В связи с этим, стараются обойти околорезонансный режим работы в процессе фрезерования «окна» в ОК, с помощью подбора соответствующих значений, определяющих параметры системы, а также устанавливая в компоновку гидравлический нагружатель конструкции компании «Перфобур», который выполняет роль автомата подачи фрезерного инструмента и демпфера продольных колебаний при дозированном регулировании осевой нагрузки [74, 107]. При установке в ТС гидравлического нагружателя и начальных условиях движения $x(0) = 0; y(0) = 1; z(0) = 0,05; \sigma = 10; r = 10,8; b = 2,6$ отображающая точка описывает предельный устойчивый цикл, показанный на Рисунок 2.4 [88].

Определено, что в процессе фрезерования «окна» в ОК наблюдается установившийся циркуляционный режим движения стружки в технологической жидкости, что говорит об удовлетворительной работе ТС [88].

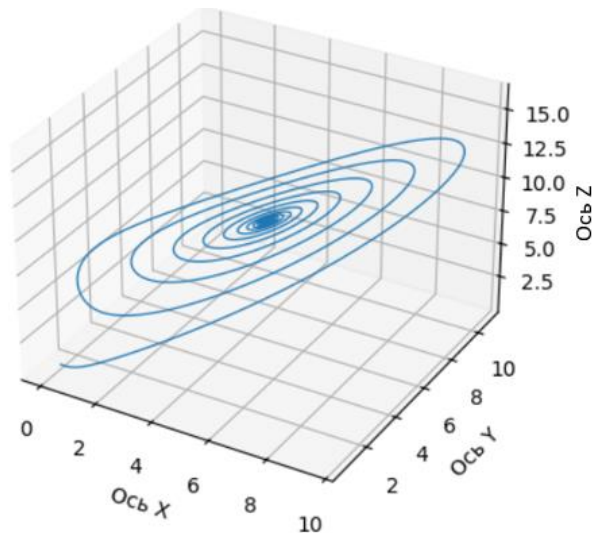


Рисунок 2.4 – Отображение фазовой траектории движения стружки в технологической жидкости при фрезеровании с гидравлическим нагрузателем

Рассчитаем основные параметры процесса фрезерования «окна» в ОК диаметром 146 мм группы прочности Д для ТС с гидравлическим нагрузателем. Массовый расход полученной стружки:

$$M_P = \frac{m}{t} = \frac{2,739}{26280} = 0,000104 \text{ кг/с} = 6,25 \text{ г/мин.}$$

Работа, затрачиваемая в процессе фрезерования «окна» в ОТ, определяется по формуле (2.8):

$$A = F_{\text{фр}} \cdot x \cdot t, \quad (2.8)$$

где $F_{\text{фр}}$ – осевая динамическая нагрузка на обсадную колонну и фрезерный инструмент, Н.

Осевая динамическая нагрузка на обсадной трубе и фрезерный инструмент по Балицкому находится по формуле (2.9) [17, 25]. В данной формуле выражение $\frac{E \cdot S_{\text{попереч}}}{c}$ обозначает волновое сопротивление [17].

$$F_{\text{фр}} = \frac{E \cdot S_{\text{попереч}}}{c} \cdot v_{\text{продол}}, \quad (2.9)$$

где E – модуль упругости материала обсадной трубы, Па;

$S_{\text{попереч}}$ – площадь поперечного сечения обсадной трубы, м²;

c – скорость упругой волны (скорости звука) в материале обсадной трубы, м/с;

$v_{\text{продол}}$ – скорость продольных колебаний фрезерного инструмента, м/с.

Площадь поперечного сечения обсадной трубы рассчитывается по формуле (2.10):

$$S_{\text{попереч}} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \quad (2.10)$$

где D – наружный диаметр ОТ, м; $D = 0,146$ м;

d – внутренний диаметр ОТ, м; $d = 0,130$ м.

Скорость продольных колебаний фрезерного инструмента рассчитывается по формуле (2.11) [25]:

$$v_{\text{продол}} = \frac{\pi^2 \cdot R \cdot n}{30 \cdot Z_B} \cdot \cos \psi', \quad (2.11)$$

где R – радиус фрезы, м; $R = 0,375$ м;

n – скорость вращения фрезерного инструмента, об/мин; $n = 253$ об/мин;

Z_B – число твёрдосплавных пластин на фрезерном инструменте, шт;

$Z_B = 24$ шт;

ψ' – угол между осью фрезерного долота и вертикальной плоскостью трубы, °.

Подставляя известные значения в формулу (2.11), получим:

$$v_{\text{продол}} = \frac{\pi^2 \cdot 0,375 \cdot 253}{60 \cdot 30 \cdot 24} \cdot \cos 6^\circ = 0,02 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Полученные значения подставим в формулу (2.9), в результате осевая динамическая нагрузка на обсадной трубе и фрезерный инструмент равна:

$$F_{\text{фр}} = \frac{2 \cdot 10^{11} \cdot \pi(0,146^2 - 0,130^2)}{5100 \cdot 4} \cdot 0,02 = 2666 \text{ Н.}$$

Работа, затрачиваемая в процессе фрезерования «окна» в обсадной трубе по формуле (2.8), равна:

$$A = 2666 \cdot 0,0000261 \cdot 26280 = 1828 \text{ Дж.}$$

Длина участка, которую можно профрезеровать во время работы:

$$h = u_{\text{ср}} \cdot t = 0,0000261 \cdot 26280 = 0,68 \text{ м.}$$

Учитывая, что длина, пройденная в процессе фрезерования «окна» в ОТ на стенде ООО «Перфобур», равна 650 мм, тогда получим эффективность фрезерования «окна»:

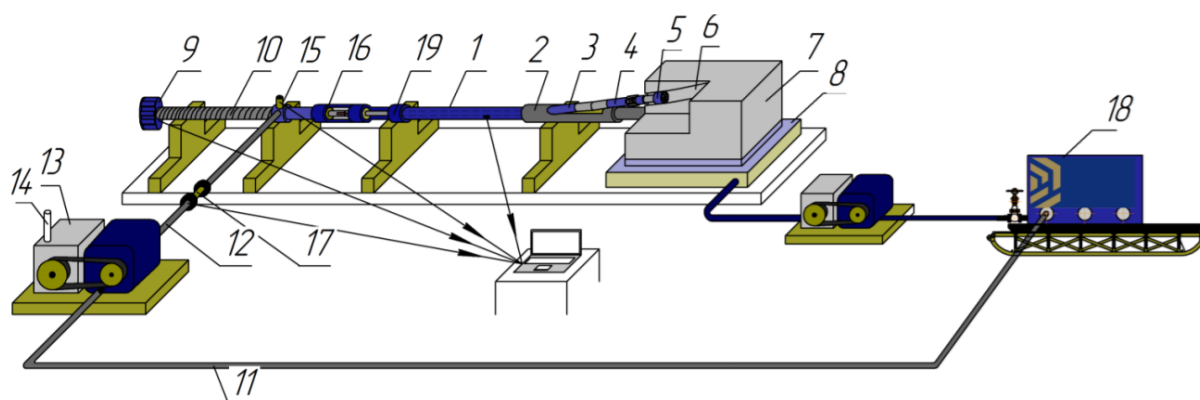
$$\theta = \left(\frac{h_{\text{ок}}}{h} \right) \cdot 100 \% = \left(\frac{0,65}{0,68} \right) \cdot 100 \% = 95 \%,$$

где θ – эффективность фрезерования «окна» в ОТ, %.

Таким образом установлена эффективность процесса фрезерования «окна» в ОТ для рассматриваемой ТС с применением гидравлического нагружателя, на основании уравнений Лоренца, исходя из отображения фазовой траектории движения стружки в технологической жидкости.

2.2 Определение оптимальных параметров системы «ВЗД-ФИ» для проведения стендовых испытаний

Испытательный стенд ООО «Перфобур», который представлен схематично на Рисунке 2.5, предназначен для проведения полномасштабного объёмного эксперимента по фрезерованию «окна» в реальном образце обсадной трубы, вмонтированной в цементно-песчаные блоки, изготовленные по стандартам API 19B [67, 84, 141, 169]. При этом обеспечивается математическое и физическое подобия параметров испытаний, благодаря чему скорости фрезерования образцов ОТ, с вероятностью 95...97 %, оказываются идентичными с результатами опытно-промысловых экспериментов на скважинах [82].



1 – корпус перфобура, 2 – клин-отклонитель, 3 – силовая секция ВЗД, 4 – шпиндель, 5 – фреза, 6 – перфорационный канал, 7 – искусственный цементно-песчаный блок, 8 – приемная емкость, 9 – привод ходового винта-нагрузателя, 10 – ходовой винт, 11 – трубопровод низкого давления для слива технологической жидкости, 12 – выкидная линия насоса, 13 – трехпоршневая насосная станция СИН 46 с частотно-регулируемым приводом насос, 14 – компенсатор колебаний давления, 15 – контрольно-измерительные приборы давления и осевой нагрузки, 16 – гидронагрузатель, 17 – рукав высокого давления, 18 – емкость, 19 – датчик вибрации

Рисунок 2.5 – Схема испытательного стенда «Перфобур» с регистрацией значений на персональном компьютере

Испытательный стенд компании ООО «Перфобур» оснащен современными средствами контроля параметров процессов фрезерования «окон» в обсадных колоннах различных групп прочности и дальнейшего бурения разветвлённых каналов в цементно-песчаных блоках. Контроллер, который входит в состав контрольно-измерительных приборов, осуществляет опрос датчиков давления МТУ-05.01-25-0,25 и МТУ-05.01-60-0,25 группы компаний «Грант», получая соответственно данные давления технологической жидкости и давления в камере подающего штока. При этом полученные данные с датчика МТУ-05.01-60-0,25 контроллер конвертирует в значения осевого усилия на породоразрушающий или фрезерный инструмент. Запись колебаний осевой нагрузки и технологической жидкости поступает от датчиков на стационарный компьютер, каждый по своему каналу связи с возможностью дальнейшей обработки и анализа данных [26, 103].

Датчики устанавливаются на гидравлическом динамометре – «месдозе». Действие гидравлического динамометра основано на измерении давления жидкости, создаваемого передаваемой через поршень осевой силой в ограниченном цилиндре. Под давлением жидкость поступает по трубке в манометр 1.3 ПТ-50 компании Физтех и отображается на шкале прибора.

Подача осевой нагрузки на горизонтально расположенную техническую систему перфобур происходит по средствам привода ходового винта, который управляется через программу на стационарном компьютере, для возможности регулирования параметра осевой нагрузки в автоматическом режиме при помощи изменения частоты вращения мотор-редуктора (Рисунки 2.6-2.7) [74, 105].



Рисунок 2.6 – Подающее устройство

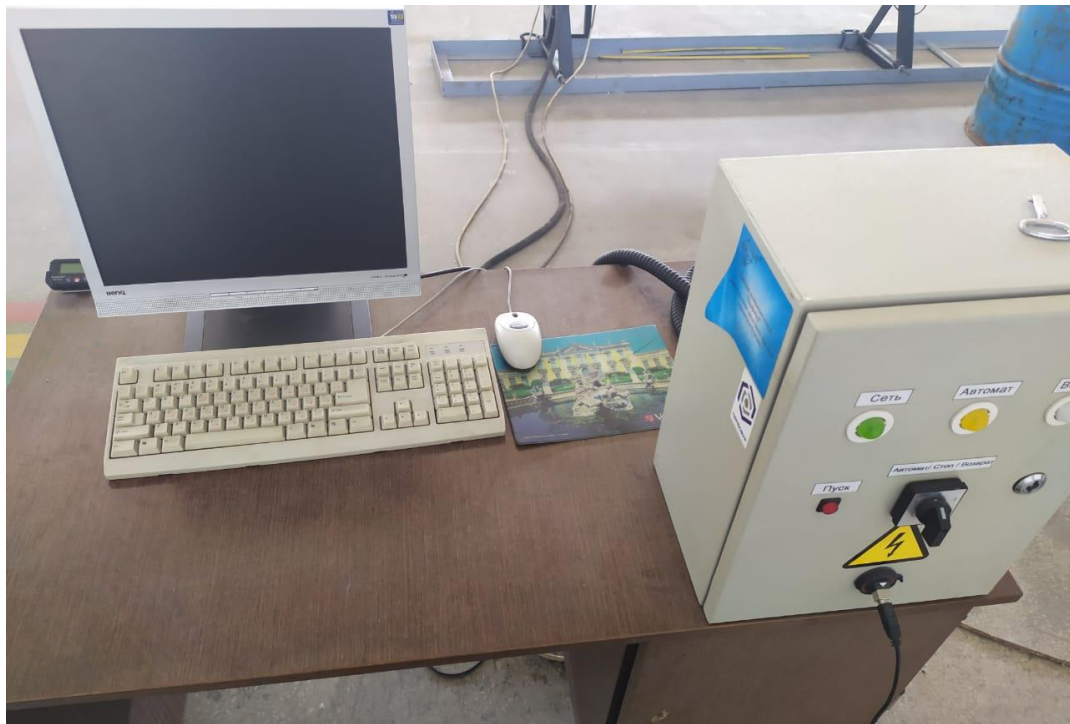


Рисунок 2.7 – Стационарный компьютер и пульт управления подающим устройством

В корпусе перфобура, располагается гибкая труба диаметром 28 мм или 32 мм, соединяющая гидравлический нагружатель и силовую секцию специального малогабаритного ВЗД, которая в свою очередь передает крутящий момент через шпиндельную секцию на породоразрушающий или фрезерный инструмент [86]. В процессе фрезерования используется специальный ВЗД габарита 54 или 55 мм с одним углом перекоса, например типа Д1-54М; Д55М.5/6.22; ДО-55.000; ДОТ-54РС.800 [139]. Для проведения испытаний по фрезерованию и дальнейшему бурению длинного канала устанавливаются цементно-песчаные блоки размером 1200/960/1000 мм из марок бетона М200 и М400 (Рисунок 2.8), изготовленные в соответствии со стандартами API в нефтяной промышленности, которые моделируют перемежаемость горных пород.



Рисунок 2.8 – Цементно-песчаные блоки

Насосная станция (Рисунок 2.9) предназначена для закачки в скважину технологической жидкости, химических реагентов в длительном режиме эксплуатации, а также сточной и пресной воды при расходах жидкости от 0 до 5 л/с при максимальном давлении 16,9 МПа.

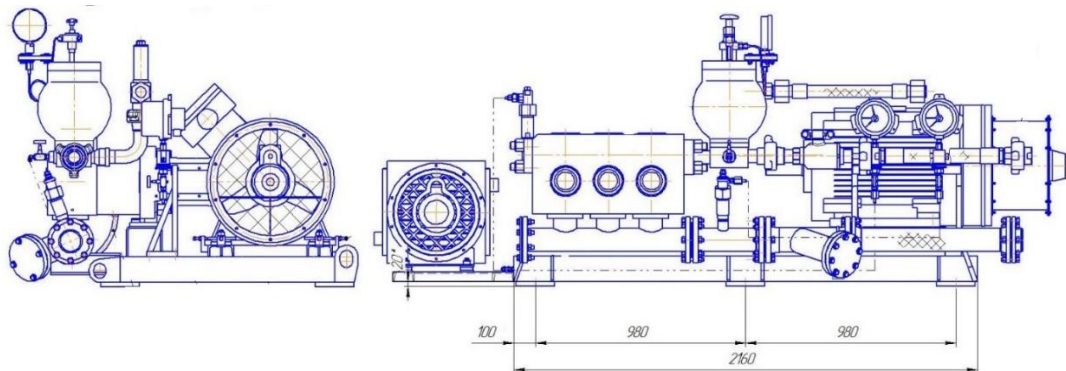


Рисунок 2.9 – Насосная установка СИН-46

Все базовые рабочие изделия технической системы несерийные и выполнены на уровне изобретения, причем отечественного производства, изготовленные по техническому заданию и конструкторской документации ООО «Перфобур». Техническая система «Перфобур» и испытательный стенд сертифицированы и соответствуют требованиям технического регламента

Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» (ТР ТС 010/2011) [43].

В компании ООО «Перфобур» работают с разными конструкциями фрез (Рисунок 2.10), сотрудничество ведется с различными фирмами по проектированию и изготовлению фрез: ООО «Petro Tool», ООО «Цитрин-Сервис», ООО «Marlin Oil Tools», ООО НПФ «Технология» и др.

Все фрезерные инструменты проходят испытания на испытательном стенде, после которых происходит обязательная коррекция конструкции фрезы при участии конструкторов ООО «Перфобур» [58, 135]. Стоит отметить, что серийно-выпускаемые фрезы для традиционных технологий «большого бурения» при зарезке боковых стволов не подходят для условий бурения специальными малогабаритными двигателями [98, 99].



Рисунок 2.10 – Некоторые конструкции фрез, применяемые компанией «Перфобур» на различных исторических этапах своего становления

На практике, компания применяет несколько видов фрез для малогабаритных ВЗД (до 55 мм) [85, 97]:

- конусные (Рисунок 2.11), которые предназначены для проработки труб, имеющих эллипсность, при расфрезеровывании поврежденных участков и для очистки «окна» в ОК;



Рисунок 2.11 – Конусные фрезы

- торцевые (Рисунок 2.12), предназначены для разрушения цементного камня по всему поперечному сечению скважины, для разбуривания песчаных пробок, расфрезеровывании участков и технологической оснастки ОК, состоящей из мягких металлов;



Рисунок 2.12 – Торцевые фрезы

- фрез-долото (Рисунок 2.13), предназначенное для разбуривания цементных мостов, песчаных пробок, прорезании «окна» в колонне и дальнейшего забуривания новых стволов в скважине [7], они имеют комбинированное вооружения из твердосплавных пластинок для улучшения работы по легким сплавам с содержанием меди или алюминия.



Рисунок 2.13 – Фрез-долото

Установлено, что в процессе опытно-промышленных испытаний на стенде ООО «Перфобур» зарегистрированы следующие технологические ситуации, соответствующие отказам системы:

- 1) заклинивание ВЗД;
- 2) подклинивание ВЗД;
- 3) износ фрезерного инструмента;
- 4) нестабильная работа насосного оборудования;
- 5) нестабильная работа технической системы;
- 6) отключение датчиков технической системы.

Отмечено, что впервые в мировой практике, в 2018 году, основателем и главным конструктором компании ООО «Перфобур» Ляговым И.А., с использованием разработанной компоновки для фрезерования, удалось вырезать фрезой диаметром 68 мм два «окна» длиной 70 мм каждое, в эксплуатационной колонне группы прочности К, с одной отметки, специальным малогабаритным ВЗД на скважине ООО «Башнефть-Добыча [142].

Для проведения эксперимента необходимо определить оптимальные параметры системы «ВЗД-ФИ», воспользовавшись принципами теории подобия, которые описывают как должны проводиться эксперименты и как анализировать

полученные данные, чтобы с минимальным количеством испытаний иметь возможность обобщать результаты и выявлять закономерности изменения параметров [89]. Необходимо учитывать, что на испытательном стенде проводят полномасштабный объемный эксперимент, то есть сходные размеры натуре и модели одинаковы, а их отношение выражается постоянной величиной равной единице, при этом сохраняется временная непрерывность эксперимента [10]. При соблюдении принципов геометрического и временного подобия скорости фрезерования «окна» в обсадной колонне также будут подобны, и в случае проведения эксперимента в полном масштабе скорости будут идентичными.

В работах Адлера Ю.П. и Козловского Е.А. [10, 66] подробно изложена теория планирования эксперимента, информация об изменяющихся факторах, к которым предъявляются различные требования. Решение экстремальной задачи предусматривает получение функции отклика и нахождение с помощью ее оптимальных условий протекания процесса фрезерования обсадной колонны. В общем параметр оптимизации τ представлен зависимостью (2.12):

$$\tau = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.12)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ – независимые переменные факторы.

Для получения уравнения регрессии необходимо определить выборочные коэффициенты регрессии: $b_0, b_1, b_2, b_{12}, \dots, b_n$, которые являются лишь оценками теоретических коэффициентов регрессии: $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_{12}, \dots, \beta_n$. Уравнение регрессии, представляющее собой выборочную оценку y функции отклика τ , может быть записано в виде формулы (2.13):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + \dots + b_nx_n^2. \quad (2.13)$$

На Рисунке 2.14, показана схема процесса фрезерования «окна» в ОК, представленная в виде «черного ящика».

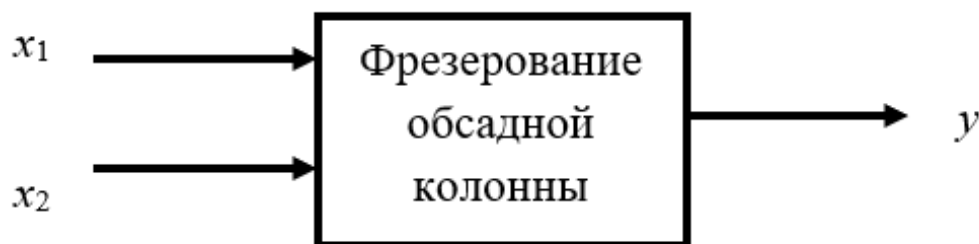


Рисунок 2.14 – Фрезерование «окна» в ОК в виде «черного ящика»

Полный факторный эксперимент даёт возможность точно измерить линейные воздействия и все взаимодействия между коэффициентами модели. Линейный эффект отражает линейную связь между параметром оптимизации и соответствующим фактором. Взаимодействие описывает совместное влияние нескольких факторов на параметр оптимизации [89]. Известна зависимость механической скорости $\bar{V}$ фрезерования «окна» в ОК по формуле (2.14) от частоты вращения фрезерного инструмента n и осевой нагрузки F на него [138]:

$$\bar{V} = f(x_1, x_2), \quad (2.14)$$

где x_1 – частота вращения фрезы, об/мин;

x_2 – осевая нагрузка, Н [10].

Полученная преобразованием функция представляет собой многочлен (2.15):

$$v_{\text{мех}} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{22}x_2^2. \quad (2.15)$$

Опыты проводились с изменением переменных x_1 (скорость вращения фрезерного инструмента) и x_2 (осевая нагрузка на фрезерный инструмент). Каждая переменная изменяема на двух уровнях, обозначенных символами «+1» и «-1». Примем, что фрезерование «окна» в обсадной колонне ведется при частоте вращения фрезерного инструмента 220 мин^{-1} и 260 мин^{-1} при осевой нагрузке на

него при 2500 Н и 2900 Н. Тогда все возможные комбинации будут представлены матрицей планирования, приведенной в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Матрица планирования факторного эксперимента типа 2^2

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$v_{\text{мех}}$
1	+1	-1	-1	+1	$v_{\text{мех}_1}$
2	+1	+1	-1	-1	$v_{\text{мех}_2}$
3	+1	-1	+1	-1	$v_{\text{мех}_3}$
4	+1	+1	+1	+1	$v_{\text{мех}_4}$

Планирование эксперимента представлено во втором и третьем столбцах Таблицы 2.1. Первая строка соответствует первому опыту, где обе независимые переменные находятся на нижнем уровне. Во втором опыте первая независимая переменная находится на верхнем уровне, вторая – на нижнем, и т.д. В результате получается многочлен вида (2.16).

$$v_{\text{мех}} = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2. \quad (2.16)$$

Основной уровень для определения оптимальных параметров ТС «ВЗД-ФИ»:

$$x_{\text{ср1}} = \frac{x_{1\text{Н}} + x_{1\text{В}}}{2} = \frac{220 + 260}{2} = 240 \text{ об/мин},$$

$$x_{\text{ср2}} = \frac{x_{2\text{Н}} + x_{2\text{В}}}{2} = \frac{2500 + 2900}{2} = 2700 \text{ Н}.$$

Интервал варьирования для определения оптимальных параметров ТС «ВЗД-ФИ»:

$$x_1 = \frac{260 - 220}{2} = 20 \text{ об/мин},$$

$$x_2 = \frac{2900 - 2500}{2} = 200 \text{ Н}.$$

Верхний уровень варьирования для определения оптимальных параметров ТС «ВЗД-ФИ»:

$$x_1 = x_{cp1} + x_1 x_2 = x_{cp2} + x_2.$$

Нижний уровень варьирования для определения оптимальных параметров ТС «ВЗД-ФИ»:

$$x_1 = x_{cp1} - x_1 x_2 = x_{cp2} - x_2.$$

Сведем в Таблицу 2.2 полученные интервалы изменения независимых переменных x_1 и x_2 .

Таблица 2.2 – Интервалы варьирования независимых переменных

Интервалы варьирования независимых переменных	x_1	x_2
Основной уровень ($x_{cp} = 0$)	240	2700
Интервал варьирования Δx_i	20	200
Верхний уровень ($x_i = +1$)	260	2900
Нижний уровень ($x_i = -1$)	220	2500

Учитывая, что количество факторов невелико и модель линейна, используем матрицей полного факторного эксперимента. Чтобы оценить отклонения оптимизационного параметра от его среднего значения, для каждой строки матрицы вычисляют дисперсию эксперимента s_j^2 на основе N параллельных опытов (2.17) [155]:

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^N (v_{mexi} - v_{mexcp})^2. \quad (2.17)$$

Если принять количество параллельных наблюдений равным 3 в каждом опыте, то общее число опытов составит 4, а количество наблюдений – 12. Для каждой строки матрицы планирования рассчитывается дисперсия s_i^2 на основе

данных о трёх параллельных опытах [155]. Расчётные значения дисперсии для каждого опыта представлены в Таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Матрица определения эксперимента для фрезерования ОК

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_{12}	Рабочая матрица		$v_{\text{мех1}}$	$v_{\text{мех2}}$	$v_{\text{мех3}}$	$v_{\text{мехср}}$	s_j^2
1	+1	-1	-1	+1	220	2500	9,43	9,21	9,84	9,49	0,0511
2	+1	+1	-1	-1	260	2500	8,42	8,98	8,02	8,47	0,1163
3	+1	-1	+1	-1	220	2900	8,91	8,35	7,95	8,40	0,1163
4	+1	+1	+1	+1	260	2900	10,39	9,96	10,62	10,32	0,0561

Проверим однородность дисперсий s_i^2 при помощи G-критерия (принимаем $\alpha = 0,05$). Установлено, что $G_p = 0,3422 < G_0 = 0,8643$, следовательно, оценки дисперсии во всех опытах однородны [15]. Тогда суммарная дисперсия воспроизводимости s_y^2 равна 0,0856. Тогда дисперсия ошибок в оценке коэффициентов регрессии $s^2\{b_i\}$ равна 0,007.

Исходя из полученных данных (Таблица 2.3) вычисляют коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_{\text{мехср}} = 9,17,$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji} \cdot v_{\text{мехср}} = 0,23,$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji} \cdot v_{\text{мехср}} = 0,19,$$

$$b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji} \cdot v_{\text{мехср}} = 0,74.$$

В итоге получен доверительный интервал для коэффициентов регрессии $\Delta b_i = 0,368$. Полученные результаты сведены в Таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Результирующая матрица планирования эксперимента

№ опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	$v_{\text{мех}}$
1	+1	-1	-1	+1	9,49
2	+1	+1	-1	-1	8,47
3	+1	-1	+1	-1	8,40
4	+1	+1	+1	+1	10,32
$\sum_{n=1}^N x_{in} v_{\text{мех}n}$	36,68	0,9	0,76	2,94	
$b_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} v_{\text{мех}n}}{\sum_{n=1}^N x_{in}^2}$	9,17	0,23	0,19	0,74	

Чтобы определить значимость коэффициентов регрессии, необходимо воспользоваться t -критерием Стьюдента [155]:

$$t_{p0} = \frac{|b_0|}{s\{b_i\}} = \frac{9,17}{0,0856} = 107,13,$$

$$t_{p1} = \frac{|b_1|}{s\{b_i\}} = \frac{0,23}{0,0856} = 2,69,$$

$$t_{p2} = \frac{|b_2|}{s\{b_i\}} = \frac{0,19}{0,0856} = 2,22,$$

$$t_{p12} = \frac{|b_{12}|}{s\{b_i\}} = \frac{0,74}{0,0856} = 8,64.$$

Табличное значение t -критерия устанавливаем при $\alpha=0,05$ и $f=12$ ($t=2,18$). При сравнении полученных расчетных значений с табличным [21], можно сделать вывод, что все коэффициенты уравнения регрессии являются значимыми.

Следовательно, подставляя полученные значения в формулу (2.15), получим следующую зависимость между механической скоростью фрезерования ОК и значениями x_1 и x_2 :

$$v_{\text{мех}} = 9,17 + 0,23x_1 + 0,19x_2 + 0,74x_1.$$

Определим расчётные значения параметра оптимизации с учётом условий экспериментов:

$$v_{\text{pac0}} = 9,44; v_{\text{pac1}} = 8,48; v_{\text{pac2}} = 8,42; v_{\text{pac12}} = 10,30.$$

При полученных значениях дисперсия адекватности $s_{\text{Ад}}^2 = 0,0111$. Чтобы проверить соответствие полученного уравнения, вычислим расчётное значение критерия Фишера (F -критерия) [155]. Примем табличное значение F -критерия составляет 4,46 [21].

$$F_p = \frac{s_{\text{Ад}}^2}{s_y^2} = \frac{0,011133}{0,0856} = 0,13006.$$

Установлено, что полученное уравнение регрессии является адекватным с доверительной вероятностью 95 %. Таким образом, полученное уравнение можно использовать для прогнозирования скорости фрезерования в зависимости от двух факторов.

Аналогично Таблице 2.4, заполняем матрицу планирования эксперимента для ортогонального центрального композиционного плана (Таблица 2.5) [155].

Таблица 2.5 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$x_1^2 - 0,667$	$x_2^2 - 0,667$	$v_{\text{мех}}$
1	+1	-1	-1	+1	0,333	0,333	9,49
2	+1	+1	-1	-1	0,333	0,333	8,47
3	+1	-1	+1	-1	0,333	0,333	8,40
4	+1	+1	+1	+1	0,333	0,333	10,32
5	+1	-1	0	0	0,333	-0,667	9,21
6	+1	+1	0	0	0,333	-0,667	8,98
7	+1	0	-1	0	-0,667	0,333	8,35
8	+1	0	+1	0	-0,667	0,333	9,96
9	+1	0	0	0	-0,667	0,667	9,84
$\sum_{n=1}^N x_{in}^2$	9	6	6	4	2	2	

Продолжение таблицы 2.5

№ опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	$x_1^2 - 0,667$	$x_2^2 - 0,667$	$v_{мех}$
$\sum_{n=1}^N x_{in} \cdot v_{мех}$	83,02	0,67	2,37	2,94	-0,50434	12,74222	
$b_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} v_{мехn}}{\sum_{n=1}^N x_{in}^2}$	9,22444	0,11167	0,39500	0,73500	-0,25217	6,37111	

Проанализировав данные в Таблице 2.5, получим, что аналитическая зависимость механической скорости от переменных x_1 и x_2 и выражается поверхностью 2-го порядка (2.18):

$$v_{мех} = 5,14311 + 0,11167x_1 + 0,39500x_2 - 0,25217x_1^2 + 6,37111x_2^2 + 0,73500x_1x_2. \quad (2.18)$$

В итоге математических преобразований получим уравнение в следующем виде (2.19) [10]:

$$-4,478 \cdot \xi^2 - 0,321 \cdot \eta^2 - 3,709 \cdot \eta + 5,827 \cdot \xi = 0. \quad (2.19)$$

После решения выражения путем выделения полного квадрата установлено, что данная поверхность является эллиптическим параболоидом [155]. Тогда независимые переменные факторы равны: $x_1 = 0,651, x_2 = -2,777$.

Так как приведенные значения x_1, x_2 связаны с истинными значениями величин n и F следующими формулами:

$$x_1 = (n - 240)/20,$$

$$x_2 = (F - 2700)/200.$$

В результате расчетов приняты следующие значения: $n = 253 \text{ мин}^{-1}$ и $F = 2145 \text{ Н}$. Эти параметры обеспечивают нормальную работу двигателя.

На Рисунке 2.15 представлена характеристика рабочей пары ВЗД ДОТ-54РС.800 при расходе воды 3 л/с [56, 106].

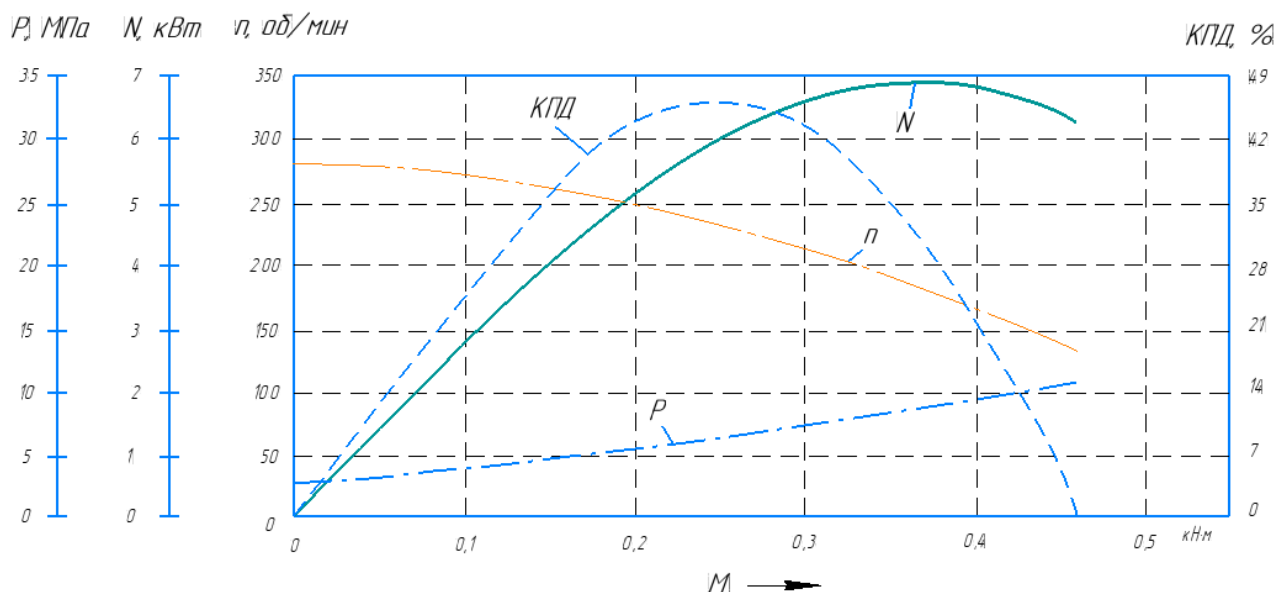


Рисунок 2.15 – Характеристика рабочей пары ВЗД 54РС.800

Повторяя расчеты, получим функцию зависимости механической скорости фрезерования двух других факторов: от крутящего момента на валу двигателя и давления технологической жидкости. Значения давления находятся в интервалах от 6 до 8 МПа, а крутящего момента — от 120 до 280 Н·м. Задача решается аналогично поставленной ранее. Функция зависимости механической скорости фрезерования «окна» в ОК от крутящего момента на валу двигателя и давления технологической жидкости представлена в (2.20):

$$\bar{V} = f(x_3, x_4), \quad (2.20)$$

где x_3 — крутящий момент на валу двигателя, Н·м;

x_4 — давление технологической жидкости, МПа.

Матрицы планирования аналогичны представленным в Таблицах 2.3 и 2.4.

В Таблице 2.6 представлено варьирование независимых переменных x_3 и x_4 .

Таблица 2.6 – Интервалы варьирования независимых переменных для новой задачи

Интервалы варьирования независимых переменных	x_3	x_4
Основной уровень ($x_{cp} = 0$)	200	7
Интервал варьирования Δx_i	75	1
Верхний уровень ($x_i = +1$)	280	8,0
Нижний уровень ($x_i = -1$)	120	6,0

В итоге получим следующую зависимость механической скорости от приведенных значений момента вращения вала ВЗД x_3 и перепада давления технологической жидкости x_4 :

$$x_3 = \frac{M-200}{80},$$

$$x_4 = \frac{P-7,0}{1}.$$

В результате расчетов приняты следующие значения: $M = 252$ Н·м и $P = 4,2$ МПа. Эти параметры обеспечивают нормальную работу двигателя ВЗД ДОТ-54РС.800 при расходе воды 3 л/с [56, 106].

Выводы по второй главе

1 Определено, что существующие математические модели процесса фрезерования не могут быть использованы для описания фрезерования «окна» в ОК специальными малогабаритными ВЗД.

2 Установлена эффективность процесса фрезерования «окна» в обсадной колонне на основании уравнений Лоренца, исходя из отображения фазовой траектории движения стружки в технологической жидкости.

3 Установлено, что при включении в компоновку гидравлического нагружателя, позволяет добиться удовлетворительной работы технической системы и уйти от резонансного режима.

4 Получены уравнения регрессии, которые являются адекватными с доверительной вероятностью 95 %, и, которые используются для прогноза скорости фрезерования обсадной колонны.

5 Получены оптимальные значения осевой нагрузки, частоты вращения фрезерного инструмента, крутящего момента и перепада давления технологической жидкости для обеспечения нормальной работы двигателя во время проведения экспериментов.

ГЛАВА 3 ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ВЗД-ФИ» ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ

3.1 Разработка нового критерия для оценки технического состояния системы «ВЗД-ФИ»

Учитывая недостатки различных критериев для определения технического состояния оборудования, выявленные в первой главе, разработан новый критерий – критерий диагностирования работоспособности по Гуверу (далее: критерий диагностирования), с помощью которого можно повысить эффективность определения технического состояния системы «ВЗД-ФИ» в процессе фрезерования «окна» в ОК [120] (Приложение А).

Известно, что в экономике критерий Гувера является самым простым из всех показателей неравенства распределения значений, он описывает относительное отклонение от среднего и является «прямым», потому что, например, в случае неравного распределения значений, он просто описывает долю общего объема значений, которая должна быть перераспределена для достижения равновесия [129]. Для расчета критерия Гувера строится кривая Лоренца, а именно зависимость количества замеренных значений случайных величин p (технологических параметров, замеренных в процессе фрезерования) по оси координат в процентах – от количества этих значений n в начале и конце каждого интервала по оси абсцисс процесса для различных состояний анализируемых объектов управления (Рисунок 3.1).

Установлено, что если бы между измерением технологических параметров фрезерования и изменением технического состояния системы «ВЗД-ФИ» существовало абсолютное равенство, то, например, 20 %-й отказ оборудования системы соответствовал бы только одним значениям параметров, 40 %-й отказ

оборудования системы – другим значениям, и т. д.

В действительности, так же, как и при вычислении коэффициента Джини, наблюдается другая картина, что представлено кривой Лоренца. Чем больше отклонение кривой Лоренца от кривой равенства, тем меньше взаимосвязь между анализируемыми показателями. При этом кривая Гувера рассчитывается как максимальный по длине вертикальный отрезок, образуемый между кривой Лоренца и линией абсолютного равенства (Рисунок 3.1).

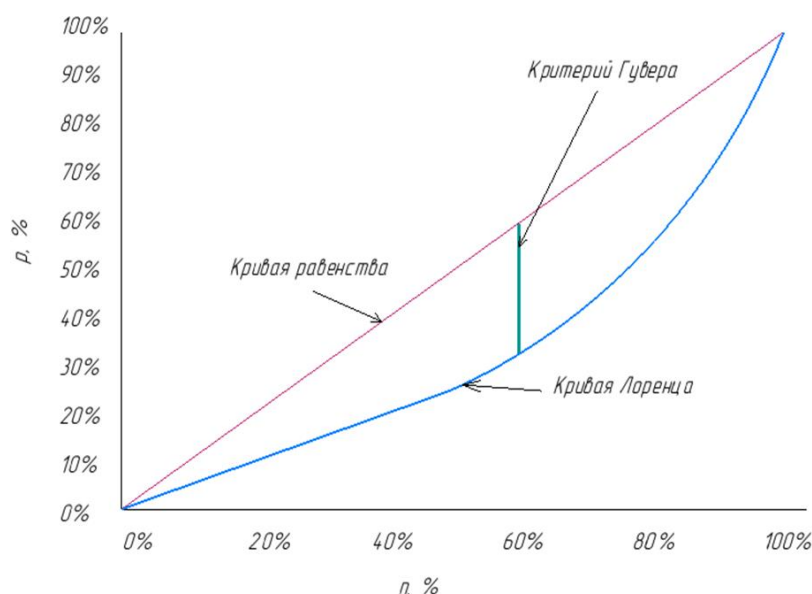


Рисунок 3.1 – Графическое изображение кривой Лоренца и критерия Гувера

Критерий работоспособности по Гуверу определяется по выражениям (3.1, 3.2):

$$H_p = \frac{1}{2} \frac{\sum_i^n |p_i - \bar{p}|}{\sum_i^n p_i}, \quad (3.1)$$

$$H_F = \frac{1}{2} \frac{\sum_i^n |F_i - \bar{F}|}{\sum_i^n F_i}, \quad (3.2)$$

где H_p – критерий работоспособности по Гуверу колебаний давления технологической жидкости;

H_F – критерий работоспособности по Гуверу колебаний осевой нагрузки на

фрезерный инструмент;

p_i – значение фрагмента записи колебаний давления технологической жидкости, представленного в виде статистического ряда, числовые значения получены через равные промежутки времени;

$\bar{p}$ – среднее значение фрагмента записи колебаний давления технологической жидкости;

n – количество значений колебаний всего ряда;

F_i – значение фрагмента записи колебаний осевой нагрузки, представленного в виде статистического ряда, числовые значения получены через равные промежутки времени;

$\bar{F}$ – среднее значение фрагмента записи колебаний осевой нагрузки.

Предложенный способ определения работоспособности технической системы «ВЗД-ФИ», включает измерения колебаний давления технологической жидкости и колебаний осевой нагрузки на фрезерном инструменте, выбор текущих критериев работоспособности, задание их контрольных значений и определение технологических ситуаций, описывающих работоспособность системы «ВЗД-ФИ», исходя из сравнения текущих значений критериев с их контрольными значениями, при этом их контрольные значения определяют экспериментально на испытательном стенде, описанном выше [137].

Критерий диагностирования определяют по формулам (3.3, 3.4):

$$K_{HP} = H_{P2} / H_{P1}, \quad (3.3)$$

$$K_{HF} = H_{F2} / H_{F1}, \quad (3.4)$$

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.

Учитывая, установленные отказы технической системы при проведении опытно-промышленных испытаний, установлены основные виды технологических ситуаций технической системы «ВЗД-ФИ» при фрезеровании ОК и значения критериев диагностирования, соответствующие им:

- 1 Возможный отказ: заклинивание ВЗД: $K_{HP} > K_{HP\text{контрол}}$ и $K_{HF} > K_{HF\text{контрол}}$.
- 2 Возможный отказ: подклинивание ВЗД: $K_{HP} > K_{HP\text{контрол}}$ или $K_{HF} > K_{HF\text{контрол}}$.
- 3 Нестабильная работа: износ фрезерного инструмента: $K_{HP} < 1,1$ и $1,4 < K_{HF} \leq K_{HF\text{контрол}}$.
- 4 Нестабильная работа насосного оборудования: $1,1 < K_{HP} \leq K_{HP\text{контрол}}$ и $K_{HF} < 1,4$.
- 5 Нестабильная работа технической системы: $1,1 < K_{HP} \leq K_{HP\text{контрол}}$ и $1,4 < K_{HF} \leq K_{HF\text{контрол}}$.
- 6 Отключение датчиков технической системы: $K_{HF} = 0,0$ или $K_{HP} = 0,0$.
- 7 Стабильная работа технической системы: $K_{HP} < 1,1$ и $K_{HF} < 1,4$.

Техническим результатом применения критериев диагностирования является своевременное диагностирование технической системы «ВЗД-ФИ», на основании обработанных значений колебаний осевой нагрузки и значений колебаний технологической жидкости на различных временных интервалах фрезерования [9]. Этот способ дает возможность достоверного определения наибольшего отклонения от контрольного значения критерия диагностирования при фрезеровании «окна» в ОК и прогнозирования предаварийного состояния технической системы [120].

На Рисунке 3.2 показана схема для реализации предлагаемого способа определения работоспособности технической системы при фрезеровании эксплуатационной колонны (ЭК) в промышленных условиях.

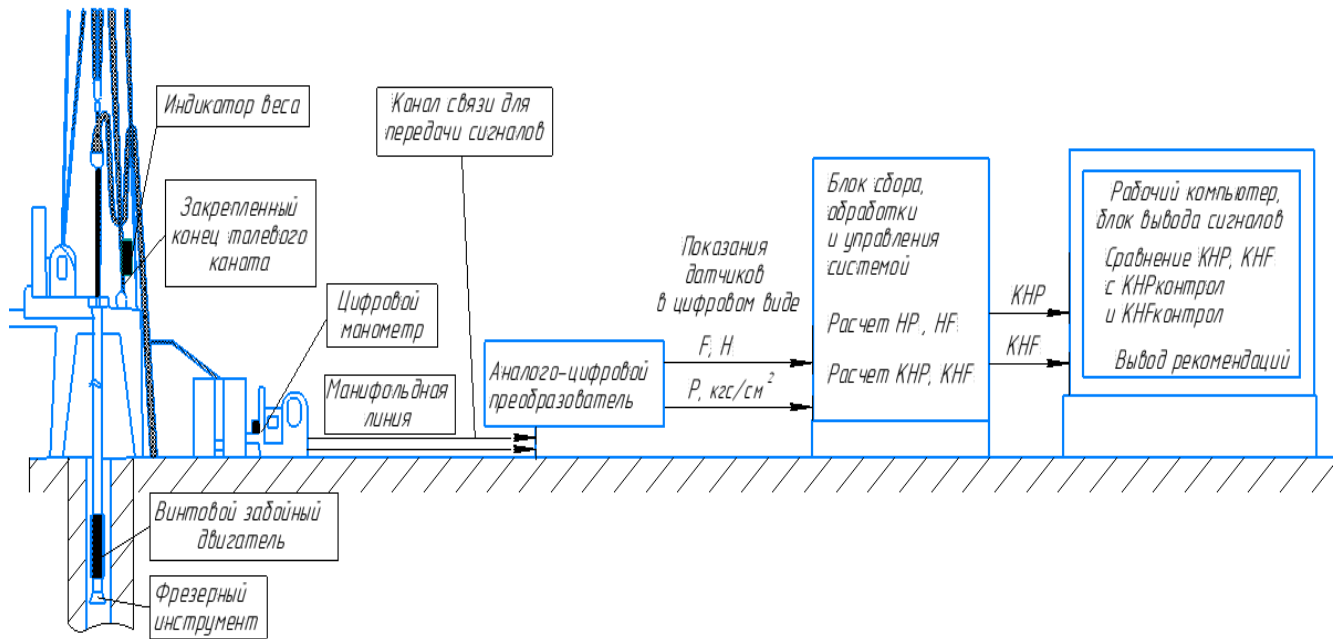


Рисунок 3.2 – Схема определения работоспособности технической системы «ВЗД-ФИ»

Определение работоспособности технической системы в условиях фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне на буровой установке реализуется следующим образом. Фрезерный инструмент в составе компоновки низа бурильной колонны спускают в скважину на нужную глубину. Гидравлический 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. При фрезеровании эксплуатационной колонны сигналы осевой нагрузки и перепада 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_R колебаний давления технологической жидкости и критерий работоспособности по Гуверу H_F колебаний осевой нагрузки на фрезерный инструмент в любой момент фрезерования на основании этих значений вычисляются текущие критерии диагностирования K_{HR} и K_{HF} . Информация поступает на рабочий компьютер и блок индикации, которые предназначены для

визуального контроля за изменением текущих величин критериев диагностирования $K_{НР}$ и $K_{НФ}$, данные значения сравниваются с контрольными $K_{НР\text{контроль}}$ и $K_{НФ\text{контроль}}$, полученными на испытательном стенде для различных условий фрезерования. На блоке индикации выводится сигнал, соответствующий той технологической ситуации, в которой находится рассматриваемая система [120].

Предложенный критерий диагностирования относится к области измерения параметров и контроля в процессе фрезерования «окна» в ОЭК нефтяных и газовых скважин, и преимущественно может быть использован при своевременном мониторинге и диагностировании работоспособности технической системы «ВЗД-ФИ», а также при разработке автоматизированных систем управления процессом фрезерования.

Пример расчета данного критерия проводится для временного ряда, состоящего из 60 значений, значения критериев рассчитываются каждые 10 с, по значениям колебаний давления технологической жидкости, полученным на испытательном стенде во время фрезерования «окна» в ОК диаметром 146 мм, толщиной стенки 8 мм и группой прочности Д с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с, последовательный расчет и его результат приведены в Таблице 3.1. Расчет критерия работоспособности по Гуверу (H_R и H_F) производится по формулам 3.1-3.2, а расчет критериев диагностирования ($K_{НР}$ и $K_{НФ}$) производится по формулам 3.3-3.4.

Таблица 3.1 – Пример расчета критерия диагностирования по значениям колебаний давления технологической жидкости

Время, с	P_i	$\bar{P}$	$ P_i - \bar{P} $	$\sum_i^n P_i - \bar{P} $	H_R	$K_{НР}$
	кгс/см ²	кгс/см ²	кгс/см ²	кгс/см ²		
1	2	3	4	5	6	7
4422	50,54		0,0690			
4423	51,09		0,6190			
4424	50,24		0,2310			
4425	51,05		0,5790			
4426	50,41		0,0610			
4427	50,13		0,3410			
4428	50,92		0,4490			
4429	49,99		0,4810			
4430	50,20		0,2710			

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
4431	50,14	50,4710	0,3310	3,432	0,03422	1,05845
4432	51,17		0,725			
4433	50,73		0,285			
4434	50,74		0,295			
4435	50,50		0,055			
4436	50,21		0,235			
4437	50,91		0,465			
4438	50,18		0,265			
4439	49,24		1,205			
4440	50,39		0,055			
4441	50,38	50,4450	0,065	3,650	0,03622	1,05048
4442	50,14		0,004			
4443	49,68		0,456			
4444	49,76		0,376			
4445	50,72		0,584			
4446	49,66		0,476			
4447	50,71		0,574			
4448	50,56		0,424			
4449	49,75		0,386			
4450	50,45		0,314			
4451	49,93	50,1360	0,206	3,800	0,03805	1,00698
4452	50,22		0,414			
4453	49,97		0,124			
4454	50,97		0,374			
4455	50,16		0,626			
4456	50,65		0,184			
4457	50,66		0,306			
4458	49,76		0,316			
4459	49,96		0,584			
4460	50,88		0,384			
4461	50,21	50,3440	0,536	3,848	0,03832	0,62060
4462	50,36		0,617			
4463	50,33		0,053			
4464	50,90		0,097			
4465	50,02		0,067			
4466	49,90		0,637			
4467	50,54		0,243			
4468	50,25		0,363			
4469	50,25		0,277			
4470	50,04		0,013			
4471	50,04	50,2630	0,013	2,380	0,02378	1,02859
4472	49,86		0,455			
4473	50,11		0,245			
4474	49,68		0,245			
4475	49,58		0,065			
4476	49,92		0,315			
4477	49,57		0,115			
4478	49,35		0,215			
4479	49,59		0,125			
4480	50,21		0,225			
4481	50,08	49,7950	0,445	2,450	0,02446	-

Аналогичный расчет проводится для временного ряда, состоящего из 60 значений, критерии рассчитываются каждые 10 с по значениям колебаний осевой нагрузки на фрезерный инструмент, полученным на испытательном стенде во время фрезерования «окна» в ОК с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с, последовательный расчет и его результат приведены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Пример расчета критерия диагностирования по значениям колебаний осевой нагрузки на фрезерный инструмент

Время, с	F_i	$\bar{F}$	$ F_i - \bar{F} $	$\sum_i^n F_i - \bar{F} $	H_F	K_{HF}
	Н	Н	Н	Н		
1	2	3	4	5	6	7
4422	3828		14,2			
4423	3830		16,2			
4424	3770		43,8			
4425	3792		21,8			
4426	3848		34,2			
4427	3877		63,2			
4428	3800		13,8			
4429	3850		36,2			
4430	3800		13,8			
4431	3743	3813,8	70,8	328	0,00430	0,91878
4432	3890		52,9			
4433	3828		9,1			
4434	3858		20,9			
4435	3802		35,1			
4436	3854		16,9			
4437	3824		13,1			
4438	3823		14,1			
4439	3789		48,1			
4440	3805		32,1			
4441	3898	3837,1	60,9	303,2	0,00395	1,08798
4442	3767		57,6			
4443	3855		30,4			
4444	3840		15,4			
4445	3826		1,4			
4446	3786		38,6			
4447	3778		46,6			
4448	3872		47,4			
4449	3803		21,6			
4450	3835		10,4			
4451	3884	3824,6	59,4	328,8	0,00430	1,25062
4452	3870		75,2			
4453	3863		68,2			
4454	3778		16,8			
4455	3795		0,2			

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7
4456	3789		5,8			
4457	3798		3,2			
4458	3750		44,8			
4459	3852		57,2			
4460	3702		92,8			
4461	3751	3794,8	43,8	408	0,00538	0,88674
4462	3792		13,4			
4463	3742		63,4			
4464	3793		12,4			
4465	3834		28,6			
4466	3848		42,6			
4467	3758		47,4			
4468	3767		38,4			
4469	3799		6,4			
4470	3860		54,6			
4471	3861	3805,4	55,6	362,8	0,00477	1,17470
4472	3734		78,7			
4473	3854		41,3			
4474	3876		63,3			
4475	3800		12,7			
4476	3740		72,7			
4477	3772		40,7			
4478	3862		49,3			
4479	3838		25,3			
4480	3804		8,7			
4481	3847	3812,7	34,3	427	0,00560	-

В Таблице 3.3 представлены совмещенные результаты вычислений критериев работоспособности по Гуверу, критериев диагностирования для каждого интервала фрезерования и соответствие интервала стабильной или нестабильной работе технической системы «ВЗД-ФИ». Контрольные значения, установленные на испытательном стенде: $K_{НР\text{контрол}} > 1,6$; $K_{НФ\text{контрол}} > 2,0$.

Таблица 3.3 – Результаты вычисления критериев диагностирования $K_{НР}$ и $K_{НФ}$ при анализе колебаний осевой нагрузки и колебаний рабочей жидкости при фрезеровании колонны

Временной интервал фрезерования, с	Критерий работоспособности по Гуверу		Критерий диагностирования		
	H_P	H_F	$K_{НР}$	$K_{НФ}$	
1	2	3	4	5	6
4422-4431	0,0342	0,0043	1,0584	0,9186	Стабильная работа
4432-4441	0,0362	0,0040	1,0505	1,0886	Стабильная работа

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6
4442-4451	0,0381	0,0043	1,0071	1,2512	Стабильная работа
4452-4461	0,0383	0,0054	0,6206	0,8866	Стабильная работа
4462-4471	0,0238	0,0048	1,0286	1,1740	Стабильная работа
4472-4481	0,0245	0,0056	0,1897	1,0711	Стабильная работа
4482-4491	0,0046	0,0060	0,9664	1,3422	Стабильная работа
4492-4501	0,0045	0,0081	1,0707	1,3692	Стабильная работа
4502-4511	0,0048	0,0110	1,0639	1,0326	Стабильная работа
...	...	...	...	...	...
18200-18209	0,0051	0,0114	1,0589	0,7500	Стабильная работа
18210-18219	0,0054	0,0085	1,0255	1,1053	Стабильная работа
18220-18229	0,0055	0,0094	0,6701	0,8602	Стабильная работа
18230-18239	0,0037	0,0081	0,9142	0,9994	Стабильная работа
18240-18249	0,0034	0,0081	1,0889	1,1368	Стабильная работа
18250-18259	0,0037	0,0092	1,0583	1,2756	Стабильная работа
18260-18269	0,0039	0,0118	1,0338	0,5793	Стабильная работа
18270-18279	0,0040	0,0068	1,0516	1,2497	Стабильная работа
18280-18289	0,0043	0,0085	0,7456	0,9124	Стабильная работа
...	...	...	...	...	...
31000-31009	0,0032	0,0078	1,0066	1,1082	Стабильная работа
31010-31019	0,0032	0,0086	1,0955	0,4998	Стабильная работа
31020-31029	0,0035	0,0043	1,0751	1,1234	Стабильная работа
31030-31039	0,0038	0,0048	0,9131	0,6413	Стабильная работа
31040-31049	0,0034	0,0031	1,1371	1,2787	Нестабильная работа насосного оборудования
31050-31059	0,0039	0,0040	1,1510	1,4386	Нестабильная работа технической системы
31060-31069	0,0045	0,0057	1,1755	1,5138	Нестабильная работа технической системы
31070-31079	0,0053	0,0086	1,1918	1,4892	Нестабильная работа технической системы
31080-31089	0,0063	0,0129	1,3968	1,7886	Нестабильная работа технической системы
31090-31099	0,0088	0,0230	-	-	Окончание эксперимента

Анализ приведенных двадцати семи временных интервалов фрезерования позволил установить, следующее распределение режимов работ:

- стабильная работа технической системы в следующем интервале – 22 интервала (81 %), где $0 < K_{НР} < 1,1$ и $0 < K_{НФ} < 1,4$;

- нестабильная работа технической системы – 4 интервалов (15 %), где $1,1 \leq K_{НР}$ или $1,4 \leq K_{НФ}$;

- нестабильная работа насосного оборудования – 1 интервал (4 %),
где $1,1 < K_{HP} \leq 1,6$ и $K_{HF} < 2,0$.

Таким образом, контролируя критерии диагностирования в процессе фрезерования «окна» в ОК можно спрогнозировать момент перехода к нестабильной работе технической системы, т.е. предотвратить наступление предаварийного состояния или отказа оборудования.

3.2 Определение технического состояния системы «ВЗД-ФИ» для различных обсадных колонн и фрезерных инструментов

Испытания проведены на стенде ООО «Перфобур», описанном во второй главе. Ниже приведены результаты расчетов критериев диагностирования для оценки работоспособности технической системы при пяти различных испытаниях (Приложение Б).

Испытание № 1.

В ходе работы проанализирован и обработан временной ряд процесса фрезерования «окна» в ОК по колебаниям давления технологической жидкости и колебаниям осевой нагрузки на фрезерный инструмент, состоящий из 26853 значений с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с. Условия проведения испытания:

- 1) ОК диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм;
- 2) группа прочности материала ОК – Д;
- 3) ВЗД диаметром 54 мм;
- 4) фреза диаметром 75 мм с твердосплавной крошкой и твердосплавными пластинами;
- 5) конструктивные особенности фрезы – трехлопастная, длина фрезы с резьбой 175 мм, промывочные отверстия 3 шт.;
- 6) тип технологической жидкости – техническая вода с плотностью 1000 кг/м^3 (1 г/см^3).

В Таблице 3.4 приведен интервал записи данных во время фрезерования «окна» в ОК.

Таблица 3.4 – Данные по фрезерованию ОК 146 мм фрезой 75 мм

Секунды работы	Значение колебаний давления технологической жидкости $P_{\text{раб}}$, кгс/см ²	Значение колебаний осевой нагрузки F , Н	Расход Q , л/с	Скорость фрезерования $V_{\text{тек.}}$, см/ч
1	5,89	0	0,01	0,00
2	5,28	42	0,01	2,14
3	5,86	79	0,01	4,01
4	5,33	0	0,01	0,00
5	5,71	56	0,01	2,82
6	5,46	77	0,01	3,88
7	5,67	0	0,01	0,00
8	5,52	71	0,01	3,61
9	5,60	0	0,01	0,00
10	5,62	3	0,01	0,14
...	...	...	...	...
26822	47,33	1295	0,01	65,64
26823	48,64	2295	0,01	116,30
26824	49,35	1969	0,01	99,76
26825	49,06	1460	0,01	73,98
26826	47,10	1250	0,01	63,33
26827	51,35	2645	0,01	134,00
26828	49,28	2370	0,01	120,10
26829	48,61	1713	0,01	86,79
26830	46,57	1329	0,01	67,33
26831	46,68	918	0,01	46,53
26832	46,50	921	0,01	46,68
26844	...	...	...	...
26851	0,00	0	0,01	0,00

Характеристика процесса фрезерования:

- общее время фрезерования (без учета простоя) – 26851 с (8,5 ч);
- проходка (от нулевой точки подающего устройства) – 0,8 м (800 мм);
- максимальная осевая нагрузка – 2500 Н;
- общая наработка ВЗД – 352200 с (97,9 ч);
- максимальная скорость проходки – $5,83 \cdot 10^{-5}$ м/с (21,00 см/ч);
- минимальная скорость проходки – $3,33 \cdot 10^{-6}$ м/с (1,20 см/ч);

- средняя скорость проходки – $2,61 \cdot 10^{-5}$ м/с (9,40 см/ч);
- максимальный перепад давления на ВЗД – 1,2 МПа (12 кгс/см²).

После проведения испытания диаметр фрезы составляет 75 мм. Износ по накладке 2-3 мм (Рисунок 3.3). Фрезерный инструмент отработал практически по всей длине накладки клин-отклонителя. В результате испытаний получилось профрезеровать «окно» длиной 36 см (Рисунок 3.4).



Рисунок 3.3 – Фрезерный инструмент после испытания



Рисунок 3.4 – Профрезерованное «окно» в ОК

При проведении испытания возникали проблемы с нагружением фрезы, присутствовали скачки нагрузки и повышенная вибрация, вследствие чего происходили частые заклинивания ВЗД-54. Во время испытания установлены следующие технологические ситуации:

- заклинивание ВЗД происходило в интервалах: 1080-1260, 4140-4440, 8820-9120, 14220-14820, 16020-16140, 17940-18180, 25320-25560 с;
- подклинивание ВЗД происходило в интервалах: 1980-2880, 5280-6180, 8881-9060 с;
- отключение датчиков происходило в интервалах: 2880-3540, 6180-6660 с.

Исходя из результатов испытаний установлено, что актуальным направлением является прогнозирование отказов технической системы с помощью критериев диагностирования. С помощью математической обработки достаточно большого временного ряда установлено, что достоверные результаты расчетов критериев диагностирования для определения работоспособного состояния технической системы могут быть получены при временном интервале в 60 с.

Для определения этого интервала произведены расчеты временного ряда из 26851 значений по 1000, 500, 400, 300, 200, 100 и 60 с. Установлено, что интервалы расчета более 60 с являются крупными, из-за этого тяжело проанализировать результаты, так как многие значения остаются неучтенными.

В Таблице 3.5 приведены результаты расчетов различных критериев диагностирования с обработкой результатов каждую минуту.

Таблица 3.5 – Расчет критериев диагностирования при фрезеровании ОК 146 мм и фрезой 75 мм

Начальный интервал работы, с	Конечный интервал работы, с	Критерий диагностирования по нагрузке	Критерий диагностирования по давлению	Начальный интервал работы, с	Конечный интервал работы, с	Критерий диагностирования по нагрузке	Критерий диагностирования по давлению	Начальный интервал работы, с	Конечный интервал работы, с	Критерий диагностирования по нагрузке	Критерий диагностирования по давлению
№	№	K_{HF}	K_{HP}	№	№	K_{HF}	K_{HP}	№	№	K_{HF}	K_{HP}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	60	0,0545	0,0519	8941	9000	1,6563	1,0700	17881	17940	0,7395	0,0921
61	120	10,3775	0,9326	9001	9060	0,4051	0,8753	17941	18000	0,8213	0,8471
121	180	0,4176	1,0700	9061	9120	1,0588	1,0125	18001	18060	0,1277	0,8776
181	240	0,9480	1,1197	9121	9180	0,7124	1,0032	18061	18120	10,2034	13,5488
241	300	4,1595	0,8924	9181	9240	1,2553	1,0405	18121	18180	0,6997	0,0850
301	360	0,8992	1,2707	9241	9300	1,3047	1,0215	18181	18240	0,4641	0,8660
361	420	0,6474	3,1682	9301	9360	0,5760	0,9135	18241	18300	1,3895	1,0884
421	480	1,0118	1,1872	9361	9420	1,1648	0,8104	18301	18360	0,4813	0,8509
481	540	0,6539	0,1273	9421	9480	0,8615	1,3604	18361	18420	0,9525	1,1804
541	600	1,8236	1,2710	9481	9540	1,2261	0,9839	18421	18480	1,0195	0,8959
601	660	0,8240	0,9388	9541	9600	1,0098	0,7951	18481	18540	1,0960	1,0199
661	720	1,0302	1,0982	9601	9660	1,0134	1,0240	18541	18600	0,6425	1,0081
721	780	0,8264	1,0160	9661	9720	1,0373	1,3221	18601	18660	1,4264	0,9687
781	840	1,0455	0,9028	9721	9780	0,7888	0,8582	18661	18720	0,8559	1,0051
841	900	0,6795	0,9119	9781	9840	0,9730	0,9640	18721	18780	1,5915	1,0849
901	960	0,8578	0,8872	9841	9900	1,0468	0,9152	18781	18840	0,4749	0,9223
961	1020	1,1969	1,1490	9901	9960	1,2112	1,1048	18841	18900	1,2851	1,0323
1021	1080	1,1213	1,2632	9961	10020	0,8237	0,9424	18901	18960	0,8848	0,9939
1081	1140	0,7520	0,8112	10021	10080	1,1569	1,0823	18961	19020	1,1304	0,9827
1141	1200	1,2085	0,8387	10081	10140	0,8570	1,0328	19021	19080	1,0458	1,0636
1201	1260	0,7597	1,0738	10141	10200	0,8327	0,9099	19081	19140	0,8873	0,9786
1261	1320	0,9769	1,1111	10201	10260	1,2049	1,0842	19141	19200	1,0202	0,9536
1321	1380	0,8769	0,9114	10261	10320	0,9337	1,0504	19201	19260	0,8887	1,0172
1381	1440	0,9551	1,1128	10321	10380	1,2510	0,9925	19261	19320	1,0161	0,9959
1441	1500	0,9156	0,8929	10381	10440	0,8132	0,8075	19321	19380	1,2836	1,0946
1501	1560	1,1144	1,0061	10441	10500	0,9492	1,1494	19381	19440	0,9321	0,8555
1561	1620	0,9779	0,9016	10501	10560	1,3011	0,9224	19441	19500	0,9090	1,0619
1621	1680	1,1170	5,1021	10561	10620	0,9184	1,0384	19501	19560	1,2324	0,9314
1681	1740	5,9123	2,9627	10621	10680	0,9716	1,2338	19561	19620	0,8538	1,1377
1741	1800	0,3775	0,0783	10681	10740	1,0776	0,8304	19621	19680	0,8132	1,0012
1801	1860	0,8524	1,1795	10741	10800	0,9375	0,9838	19681	19740	1,1281	0,9132

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1861	1920	0,8290	0,7257	10801	10860	0,9394	1,0617	19741	19800	1,0175	1,1360
1921	1980	1,0827	1,1675	10861	10920	0,9599	0,9206	19801	19860	1,5872	0,9999
1981	2040	0,6881	0,8725	10921	10980	0,9726	0,9542	19861	19920	0,4156	0,8785
2041	2100	0,7701	1,0211	10981	11040	1,1601	0,9544	19921	19980	1,4283	1,0194
2101	2160	0,6771	0,8446	11041	11100	0,9211	0,9465	19981	20040	0,9975	0,9670
2161	2220	1,0775	1,4892	11101	11160	1,1856	1,1065	20041	20100	1,3959	1,0455
2221	2280	0,9521	0,5785	11161	11220	1,0198	1,0726	20101	20160	0,7029	1,0311
2281	2340	1,0510	1,7586	11221	11280	0,7166	0,8542	20161	20220	1,0243	0,9225
2341	2400	1,1836	0,8812	11281	11340	1,3829	1,1633	20221	20280	0,9800	1,0483
2401	2460	0,9708	0,9879	11341	11400	0,6670	0,9781	20281	20340	1,2596	0,9449
2461	2520	0,9467	0,6197	11401	11460	1,2907	0,9808	20341	20400	0,6450	1,0033
2521	2580	1,1638	1,2398	11461	11520	1,3409	1,6469	20401	20460	1,1928	0,9782
2581	2640	0,8983	0,8498	11521	11580	0,5581	0,8539	20461	20520	1,1056	1,1278
2641	2700	1,4598	2,8779	11581	11640	1,1331	0,8224	20521	20580	1,0535	1,0288
2701	2760	0,9044	0,5637	11641	11700	1,4072	1,1886	20581	20640	0,8940	0,9606
2761	2820	1,3263	0,8809	11701	11760	0,7382	0,7463	20641	20700	0,9976	0,9974
2821	2880	0,6750	1,0985	11761	11820	1,0404	1,0815	20701	20760	0,9739	1,0301
2881	2940	1,1010	0,9276	11821	11880	0,9594	0,9633	20761	20820	0,7590	1,0176
2941	3000	0,9053	1,0157	11881	11940	0,6371	1,4103	20821	20880	0,9800	0,8860
3001	3060	1,4101	1,4544	11941	12000	2,3065	0,6757	20881	20940	1,1477	1,0701
3061	3120	0,6615	0,6247	12001	12060	0,7471	0,9407	20941	21000	1,3576	0,9415
3121	3180	1,1013	1,2819	12061	12120	1,0647	1,1494	21001	21060	0,7911	0,9879
3181	3240	1,0144	1,0258	12121	12180	0,9936	1,0131	21061	21120	1,2821	1,0353
3241	3300	0,8503	0,8954	12181	12240	0,8078	0,9265	21121	21180	0,4512	0,9912
3301	3360	0,8898	0,6788	12241	12300	1,1488	0,9779	21181	21240	10,9951	8,1707
3361	3420	1,6074	1,9120	12301	12360	1,0567	1,0755	21241	21300	0,5168	0,1826
3421	3480	0,7922	0,7403	12361	12420	1,0883	0,8816	21301	21360	0,8097	0,6480
3481	3540	1,1213	1,1255	12421	12480	1,3374	1,1813	21361	21420	0,7043	1,1200
3541	3600	0,9170	0,8966	12481	12540	0,1622	1,0261	21421	21480	0,9015	1,0463
3601	3660	1,5695	0,9286	12541	12600	3,8110	0,8180	21481	21540	0,9364	0,9182
3661	3720	0,0000	0,9783	12601	12660	1,2425	1,1807	21541	21600	1,3801	1,1809
3721	3780	0,0000	0,7594	12661	12720	0,7433	0,9908	21601	21660	0,6105	0,8602
3781	3840	0,0000	1,2055	12721	12780	1,3686	0,8833	21661	21720	0,8846	0,9001
3841	3900	0,0000	1,8143	12781	12840	1,2367	1,6493	21721	21780	1,2258	0,9714
3901	3960	0,0000	7,3033	12841	12900	0,5533	0,5802	21781	21840	0,8415	0,9999
3961	4020	0,8375	0,1245	12901	12960	1,1731	1,0315	21841	21900	1,0858	1,0307
4021	4080	0,3142	0,6137	12961	13020	1,2012	1,1388	21901	21960	0,7208	0,9887
4081	4140	1,1286	1,9079	13021	13080	1,1450	0,9989	21961	22020	1,1471	1,0190
4141	4200	1,1239	0,7713	13081	13140	1,0701	1,1258	22021	22080	0,9209	1,1137
4201	4260	1,7362	10,2599	13141	13200	0,7572	1,2213	22081	22140	1,0243	1,0775
4261	4320	0,8651	0,4737	13201	13260	0,5980	0,6631	22141	22200	1,2403	0,8247
4321	4380	1,0446	0,1423	13261	13320	1,1720	1,1412	22201	22260	0,7985	1,1632
4381	4440	0,6046	1,1475	13321	13380	0,8716	1,4672	22261	22320	1,2234	1,1110

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4441	4500	0,9195	1,0912	13381	13440	1,4974	0,7754	22321	22380	0,8773	0,7768
4501	4560	1,1989	1,0540	13441	13500	0,9321	0,9112	22381	22440	0,9198	1,0610
4561	4620	1,8309	1,3234	13501	13560	0,6044	1,0476	22441	22500	1,2369	1,0620
4621	4680	0,4474	0,7243	13561	13620	1,9506	1,0754	22501	22560	0,6360	1,0881
4681	4740	1,0745	0,8951	13621	13680	0,9824	0,9310	22561	22620	1,2877	0,8381
4741	4800	0,7624	1,2293	13681	13740	0,8442	0,8891	22621	22680	0,9402	1,0029
4801	4860	1,0589	0,9377	13741	13800	1,3876	1,1162	22681	22740	1,3620	1,1359
4861	4920	0,8580	0,7052	13801	13860	0,7038	0,8881	22741	22800	0,7538	0,9409
4921	4980	1,3133	0,8272	13861	13920	1,1376	1,6910	22801	22860	0,8305	0,9035
4981	5040	0,8650	1,1458	13921	13980	0,8807	0,6301	22861	22920	0,9365	1,0540
5041	5100	1,3174	1,0458	13981	14040	1,4023	1,1549	22921	22980	1,1909	0,8950
5101	5160	0,9816	0,8245	14041	14100	0,5415	0,7490	22981	23040	1,0926	1,0469
5161	5220	0,9728	0,8777	14101	14160	1,1227	0,8444	23041	23100	1,0516	1,1401
5221	5280	0,9826	1,1761	14161	14220	0,9051	1,3626	23101	23160	0,7278	1,0437
5281	5340	1,1285	1,2678	14221	14280	1,5061	1,0432	23161	23220	1,1568	0,9216
5341	5400	0,8403	1,1213	14281	14340	0,9017	0,9042	23221	23280	0,7963	0,9189
5401	5460	0,9381	1,1934	14341	14400	0,8585	1,0043	23281	23340	1,3113	1,0145
5461	5520	0,8515	0,8173	14401	14460	7,9313	14,4931	23341	23400	1,1625	1,0702
5521	5580	0,9877	1,1576	14461	14520	0,6706	0,0814	23401	23460	0,5182	0,9611
5581	5640	0,9858	1,1467	14521	14580	0,6362	0,9138	23461	23520	1,4846	0,9988
5641	5700	0,9198	0,5950	14581	14640	0,7406	0,8798	23521	23580	1,1057	1,1633
5701	5760	1,0487	1,0907	14641	14700	0,4957	1,0509	23581	23640	0,8905	0,8290
5761	5820	0,9854	1,3053	14701	14760	1,2970	1,0010	23641	23700	1,1097	1,1528
5821	5880	0,9261	0,8869	14761	14820	0,7805	0,9074	23701	23760	0,6722	0,8978
5881	5940	1,1081	0,7432	14821	14880	1,5364	1,1543	23761	23820	1,1978	1,0315
5941	6000	0,8467	1,4458	14881	14940	0,4596	1,0387	23821	23880	1,4473	1,0935
6001	6060	1,5591	1,2633	14941	15000	1,2143	0,9377	23881	23940	0,4276	0,9651
6061	6120	0,8249	0,9334	15001	15060	1,0392	0,9591	23941	24000	1,2585	0,9760
6121	6180	1,1213	0,8812	15061	15120	1,0489	1,1350	24001	24060	1,1401	1,0074
6181	6240	0,9537	0,6632	15121	15180	1,0563	1,0635	24061	24120	0,8090	0,9337
6241	6300	2,1984	14,7829	15181	15240	1,1047	0,9072	24121	24180	1,2028	1,0080
6301	6360	3,4908	0,0000	15241	15300	0,7413	0,9494	24181	24240	0,7661	1,0615
6361	6420	0,1049	0,0000	15301	15360	1,1424	1,0701	24241	24300	1,4585	1,0065
6421	6480	1,4650	0,0834	15361	15420	1,0701	0,8425	24301	24360	0,7089	0,8767
6481	6540	0,7549	1,2369	15421	15480	1,0735	1,0087	24361	24420	0,4836	1,0803
6541	6600	0,8841	0,8582	15481	15540	0,9719	0,7982	24421	24480	0,9979	0,9922
6601	6660	0,9785	1,1402	15541	15600	0,5224	1,2327	24481	24540	1,0222	0,9493
6661	6720	1,4059	1,2734	15601	15660	1,2367	0,9645	24541	24600	1,5675	0,8780
6721	6780	0,8124	0,7356	15661	15720	1,2194	0,9899	24601	24660	1,2183	1,1980
6781	6840	1,2129	1,3446	15721	15780	1,0129	1,1188	24661	24720	1,0493	1,0053
6841	6900	0,8716	0,8328	15781	15840	1,2424	0,9847	24721	24780	0,7030	1,0839
6901	6960	1,2374	1,0192	15841	15900	0,9513	0,8810	24781	24840	0,8078	0,9588
6961	7020	0,6915	1,1674	15901	15960	0,6211	1,6358	24841	24900	1,1420	0,9785

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7021	7080	1,0833	0,8177	15961	16020	2,0240	11,8152	24901	24960	1,5988	0,9613
7081	7140	1,0205	0,9614	16021	16080	1,6369	0,0552	24961	25020	1,1127	1,1407
7141	7200	0,9891	1,0192	16081	16140	0,7465	1,0834	25021	25080	0,8455	0,9136
7201	7260	0,9676	0,9969	16141	16200	1,3498	1,0245	25081	25140	1,0020	0,9707
7261	7320	1,0079	1,0527	16201	16260	0,4879	0,9467	25141	25200	2,0638	16,0088
7321	7380	0,8238	0,9174	16261	16320	0,9508	0,8045	25201	25260	0,5021	0,6250
7381	7440	1,1778	1,1139	16321	16380	1,3185	1,7033	25261	25320	1,1967	0,1064
7441	7500	0,8612	0,8929	16381	16440	0,8838	0,6763	25321	25380	0,5073	0,9801
7501	7560	1,1494	1,0368	16441	16500	1,0201	1,1956	25381	25440	0,8201	1,0209
7561	7620	1,2761	1,1528	16501	16560	0,8457	0,9145	25441	25500	1,3970	0,9779
7621	7680	0,7789	0,8166	16561	16620	1,4457	0,9667	25501	25560	3,8330	4,9344
7681	7740	1,0600	1,0615	16621	16680	0,5640	1,0354	25561	25620	8,9623	2,7597
7741	7800	1,0531	1,0813	16681	16740	1,1671	0,8192	25621	25680	0,3961	0,0686
7801	7860	0,8701	0,9808	16741	16800	0,9854	1,2160	25681	25740	0,5918	1,1443
7861	7920	0,9742	0,8893	16801	16860	0,8343	0,9402	25741	25800	0,4351	0,9156
7921	7980	1,0665	1,0227	16861	16920	1,0556	0,9762	25801	25860	0,9279	0,9546
7981	8040	1,0861	1,0396	16921	16980	2,2122	1,2580	25861	25920	1,1433	1,1097
8041	8100	0,8856	0,9910	16981	17040	0,3399	0,8232	25921	25980	0,9859	1,0691
8101	8160	1,2163	1,0343	17041	17100	1,5161	1,1615	25981	26040	1,1382	0,9614
8161	8220	0,8565	0,8978	17101	17160	1,1722	0,8651	26041	26100	1,0816	1,1463
8221	8280	0,7641	1,0666	17161	17220	0,8770	0,8938	26101	26160	0,8871	0,8716
8281	8340	1,2348	1,0269	17221	17280	0,7985	1,3221	26161	26220	0,8206	0,9682
8341	8400	1,0605	0,9354	17281	17340	1,1183	0,8077	26221	26280	0,7175	0,9505
8401	8460	1,3033	1,2182	17341	17400	1,2123	1,3342	26281	26340	1,1667	0,9551
8461	8520	0,7131	0,8431	17401	17460	1,2434	0,8195	26341	26400	1,2216	0,9199
8521	8580	1,0889	1,1644	17461	17520	0,5958	1,0056	26401	26460	0,8908	1,1341
8581	8640	1,1372	0,9787	17521	17580	1,3456	0,9829	26461	26520	0,8654	0,8631
8641	8700	0,7889	0,8427	17581	17640	0,5844	1,0163	26521	26580	1,0918	1,1645
8701	8760	1,2306	1,2702	17641	17700	1,2089	0,9560	26581	26640	0,8317	1,0887
8761	8820	5,8200	18,1558	17701	17760	0,9911	1,1945	26641	26700	1,5959	0,8560
8821	8880	0,7849	0,1792	17761	17820	1,3435	0,8141	26701	26760	1,0992	1,3269
8881	8940	0,3474	0,3087	17821	17880	7,2899	15,6584	26761	26820	2,6419	10,4838
								26821	26851	-	-

Сопоставляя интервалы зарегистрированных отказов во время проведения испытания со значениями, полученными при расчете по колебаниям давления технологической жидкости и осевой нагрузки установлено, что только критерий диагностирования позволяет спрогнозировать различные технологические ситуации, которые могут возникнуть на протяжении всего процесса фрезерования «окна» в ОК.

На Рисунке 3.5 изображен график записи значений осевой нагрузки в процессе фрезерования «окна» в ОК. По результатам испытаний известно, что во время работы происходили многочисленные подклинивания и заклинивания ВЗД, а также отключение датчиков осевой нагрузки.

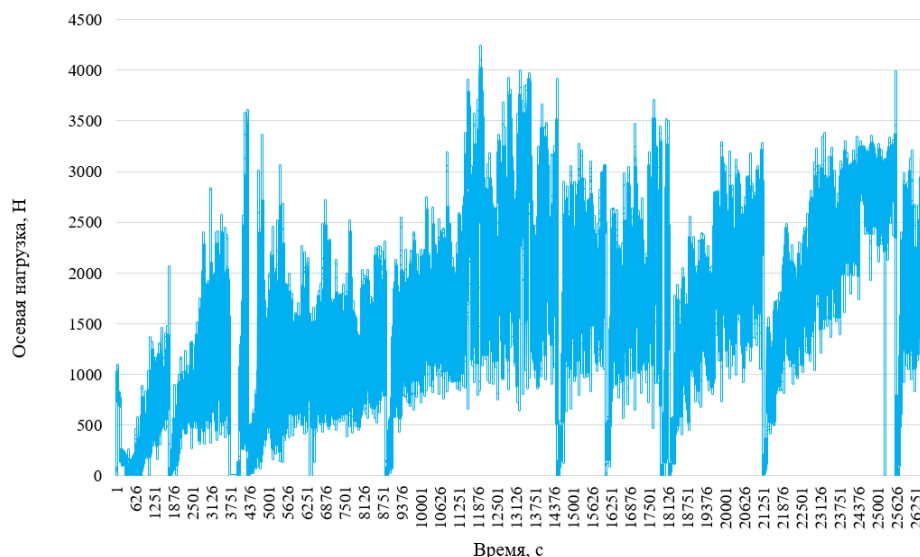


Рисунок 3.5 – Запись колебаний осевой нагрузки по времени фрезерования

На Рисунке 3.6 изображен график записи значений давления технологической жидкости в процессе фрезерования «окна» в ОК. По результатам испытаний известно, что во время работы происходили многочисленные подклинивания и заклинивания ВЗД, а также отключение датчиков давления технологической жидкости.

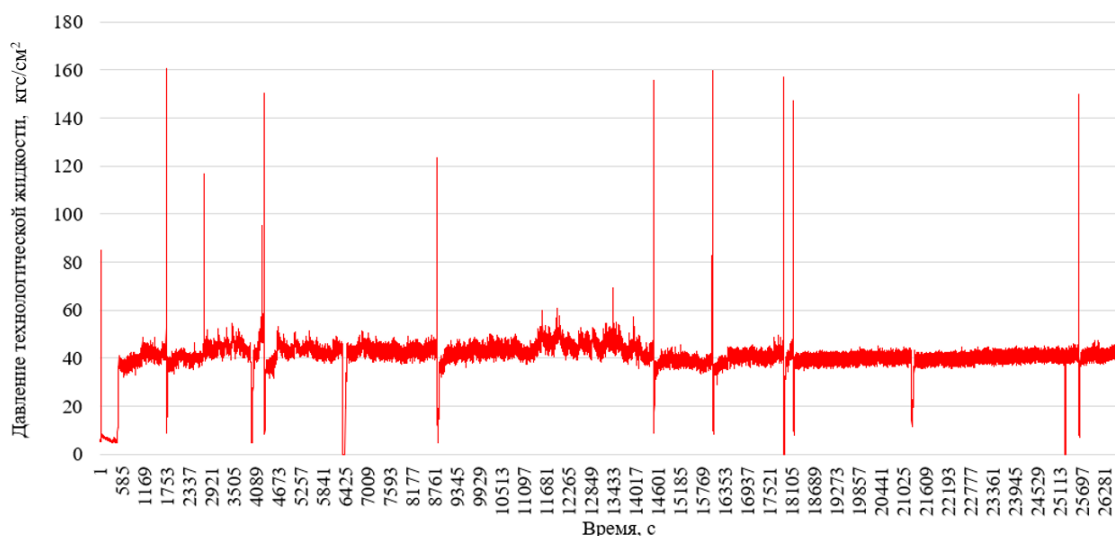


Рисунок 3.6 – Запись колебаний давления технологической жидкости по времени

В ходе испытания по фрезерованию ОК диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм и группой прочности материала – Д, установлены следующие значения критериев диагностирования:

1 По колебаниям давления технологической жидкости:

- $K_{НР} \leq 1,1$ – работа технической системы в следующем интервале – стабильная;
- $1,1 < K_{НР} \leq 1,6$ – работа технической системы в следующем интервале – нестабильная;
- $K_{НР} > 1,6$ – вероятный отказ оборудования в следующем интервале.

2 По колебаниям осевой нагрузки:

- $K_{НФ} \leq 1,4$ – работа технической систем в следующем интервале – стабильная;
- $1,4 < K_{НФ} \leq 2,0$ – работа технической систем в следующем интервале – нестабильная;
- $K_{НФ} > 2,0$ – вероятный отказ оборудования в следующем интервале.

Установлено несколько технологических ситуаций системы «ВЗД-ФИ» и соответствующие им значения критериев диагностирования:

1 Возможный отказ: заклинивание ВЗД: $K_{НФ} > 2,0$ и $K_{НР} > 1,6$.

2 Возможный отказ: подклинивание ВЗД: $K_{НФ} > 2,0$ или $K_{НР} > 1,6$.

3 Нестабильная работа: износ фрезерного инструмента: $1,4 < K_{HF} \leq 2,0$ и $K_{HP} < 1,1$.

4 Нестабильная работа насосного оборудования: $K_{HF} < 1,4$ и $1,1 < K_{HP} \leq 1,6$.

5 Нестабильная работа технической системы: $1,4 < K_{HF} \leq 2,0$ и $1,1 < K_{HP} \leq 1,6$.

6 Стабильная работа технической системы: $K_{HF} < 1,4$ и $K_{HP} < 1,1$.

7 Отключение датчиков технической системы: $K_{HF} = 0,0$ или $K_{HP} = 0,0$.

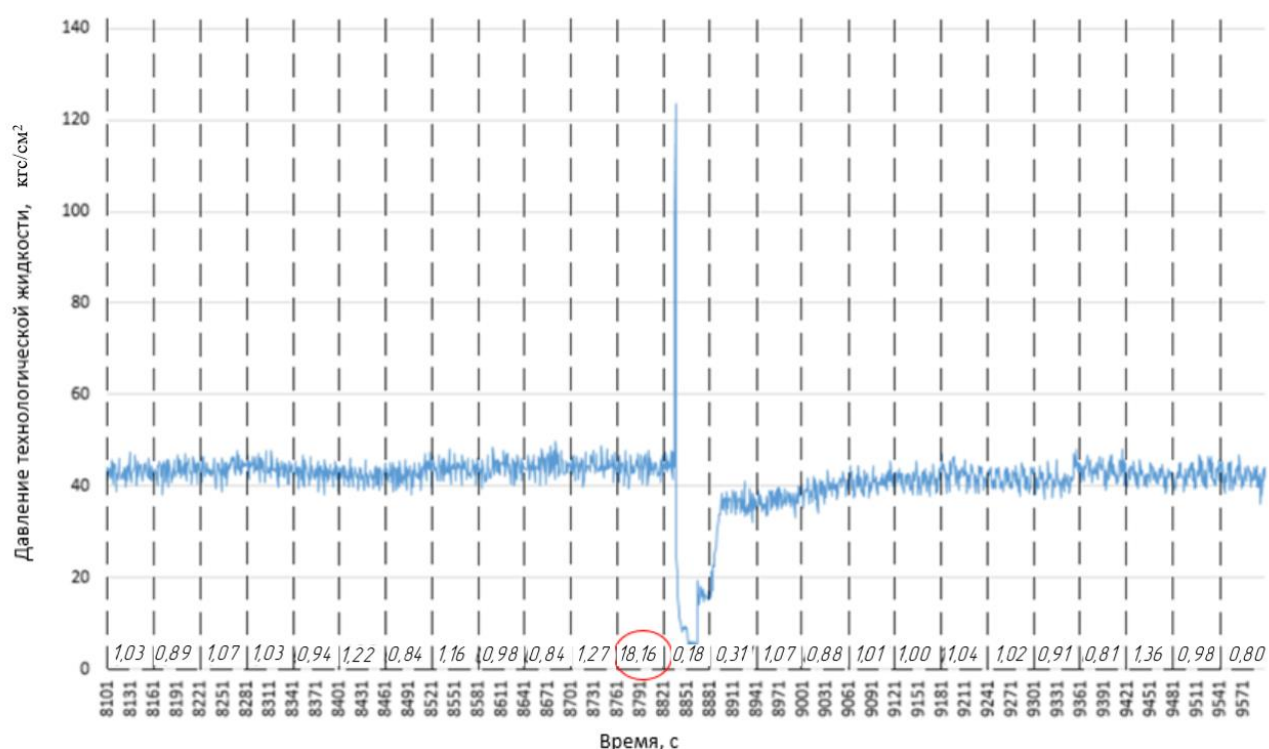
На Рисунках 3.7 и 3.8 изображен выбранный интервал колебаний давления технологической жидкости и осевой нагрузки на фрезерный инструмент, соответственно. Данные графики показывают интервал по времени фрезерования с 8101 до 9570 с, на них отображены полученные значения критериев диагностирования с интервалом расчета $\Delta t = 60$ с. Установлено, что перед моментом заклинивания ВЗД (интервал заклинивания 8821-8880 с) критерий диагностирования по давлению начал постепенно увеличиваться (Рисунок 3.7):

- на интервале 8641-8700 с – $K_{HP} = 0,84$ (интервал 8701-8760 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 8701-8760 с – $K_{HP} = 1,27$ (интервал 8761-8820 с – нестабильная работа насосного оборудования);
- на интервале 8761-8820 с – $K_{HP} = 18,16$ (интервал 8821-8880 с – возможный отказ оборудования: заклинивание ВЗД);
- на интервале 8821-8880 с – $K_{HP} = 0,18$ (интервал 8881-8940 с – восстановление стабильной работы технической системы).

Установлено, что перед моментом заклинивания ВЗД (интервал заклинивания 8821-8880 с) критерий диагностирования по осевой нагрузке начал постепенно увеличиваться (Рисунок 3.8):

- на интервале 8641-8700 с – $K_{HF} = 0,79$ (интервал 8701-8760 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 8701-8760 с – $K_{HF} = 1,23$ (интервал 8761-8820 с – стабильная работа технической системы);

- на интервале 8761-8820 с – $K_{HF} = 5,82$ (интервал 8821-8880 с – возможный отказ оборудования: заклинивание ВЗД);
- на интервале 8821-8880 с – $K_{HF} = 0,78$ (интервал 8881-8940 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 8881-8940 с – $K_{HF} = 0,35$ (интервал 8941-9000 с – стабильная работа технической системы).



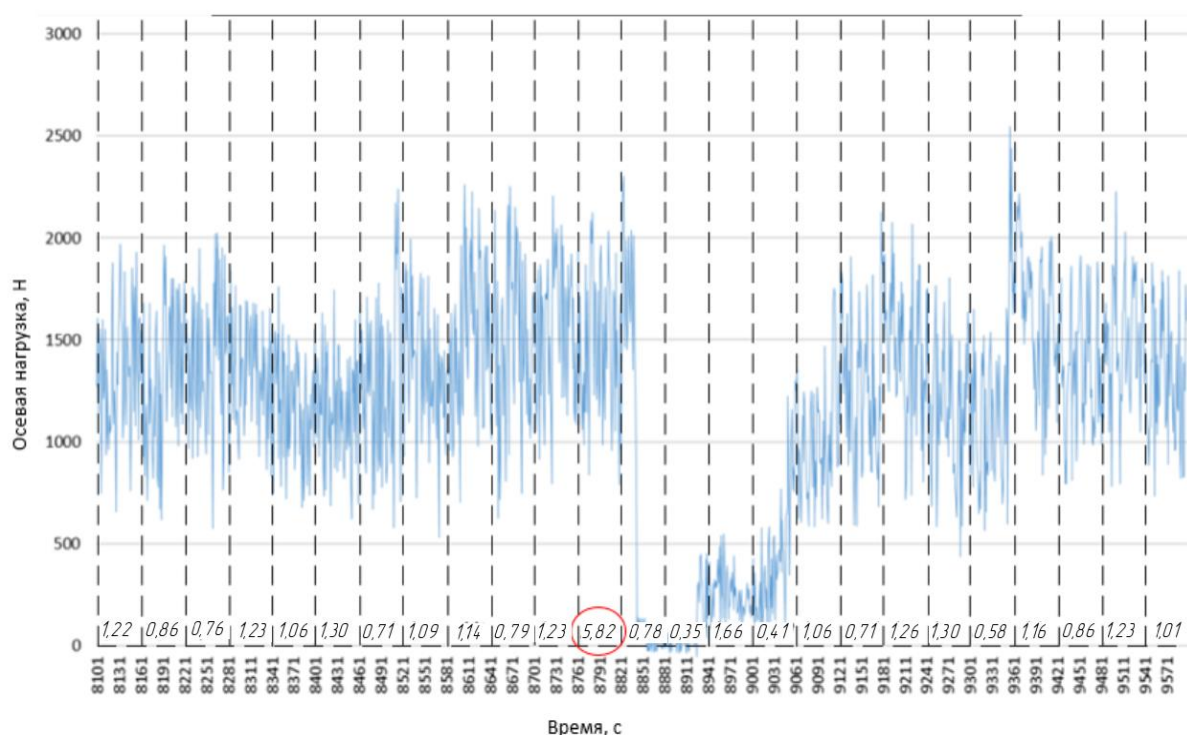


Рисунок 3.8 – Запись интервала колебаний осевой нагрузки по времени со значениями критерия диагностирования

На Рисунках 3.9 и 3.10 изображены выбранные интервалы колебаний давления технологической жидкости и осевой нагрузки на фрезерный инструмент, соответственно. Данные графики отображают интервал по времени фрезерования с 11401 с до 12120 с, на них отображены посчитанные значения критериев диагностирования с интервалом расчета $\Delta t = 60$ с.

Установлено, что перед моментом подклинивания ВЗД (интервал: 11521-11580 с) критерий диагностирования по давлению технологической жидкости выше установленного контрольного значения (Рисунок 3.9):

- на интервале 11401-11460 с – $K_{НР} = 0,98$ (интервал 11461-11520 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11461-11520 с – $K_{НР} = 1,65$ (интервал 11521-11580 с – возможный отказ оборудования: подклинивание ВЗД);
- на интервале 11521-11580 с – $K_{НР} = 0,85$ (интервал 11581-11640 с – восстановление стабильной работы технической системы);

- на интервале 11581-11640 с – $K_{НР} = 0,82$ (интервал 11641-11700 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11641-11700 с – $K_{НР} = 1,19$ (интервал 11701-11760 с – нестабильная работа технической системы);
- на интервале 11701-11760 с – $K_{НР} = 0,75$ (интервал 11761-11820 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 11761-11820 с – $K_{НР} = 1,08$ (интервал 11821-11880 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11821-11880 с – $K_{НР} = 0,96$ (интервал 11881-11940 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11881-11940 с – $K_{НР} = 1,41$ (интервал 11941-12000 с – нестабильная работа насосного оборудования);
- на интервале 11941-12000 с – $K_{НР} = 0,94$ (интервал 12001-12060 с – восстановление стабильной работы технической системы).

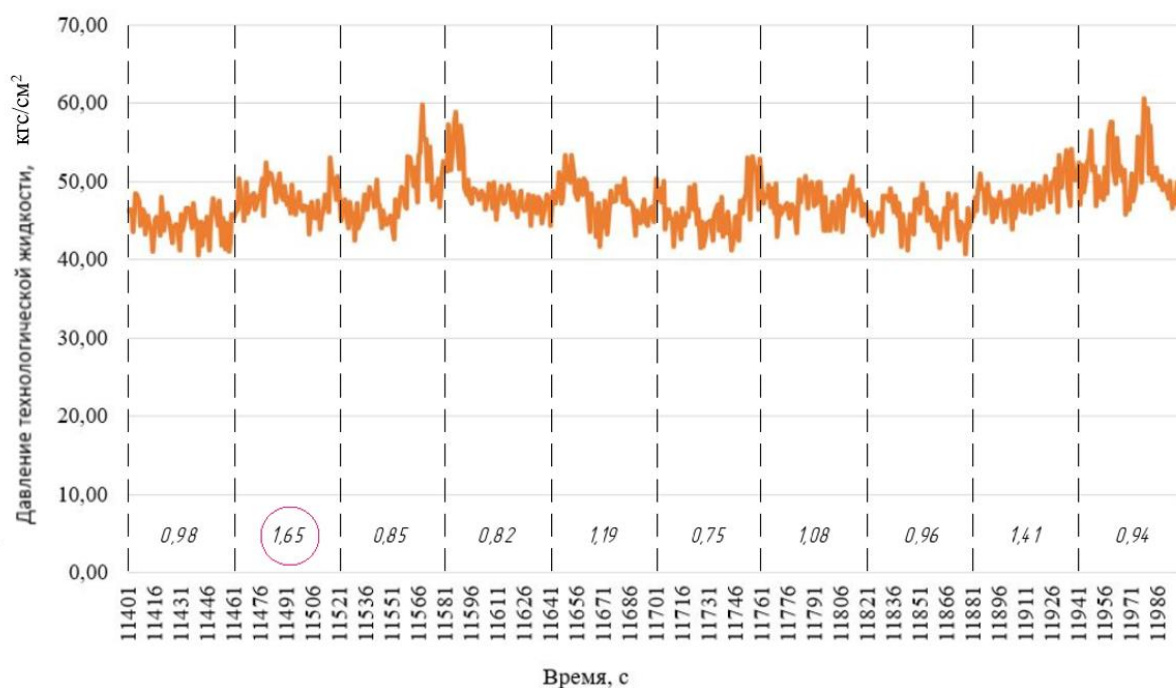


Рисунок 3.9 – Запись интервала колебаний давления технологической жидкости по времени со значениями критерия диагностирования

Установлено, что перед моментом подклинивания ВЗД (интервалы: 12002-12061 с) критерий диагностирования по осевой нагрузке выше установленного контрольного значения (Рисунок 3.10):

- на интервале 11521-11580 с – $K_{HF} = 0,56$ (интервал 11581-11640 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11581-11640 с – $K_{HF} = 1,13$ (интервал 11641-11700 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11641-11700 с – $K_{HF} = 1,41$ (интервал 11701-11760 с – нестабильная работа технической системы);
- на интервале 11701-11760 с – $K_{HF} = 0,74$ (интервал 11761-11820 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 11761-11820 с – $K_{HF} = 1,04$ (интервал 11821-11880 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11821-11880 с – $K_{HF} = 0,96$ (интервал 11881-11940 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11881-11940 с – $K_{HF} = 0,64$ (интервал 11941-12000 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11941-12000 с – $K_{HF} = 2,31$ (интервал 12001-12060 с – возможный отказ оборудования: подклинивание ВЗД);
- на интервале 12001-12060 с – $K_{HF} = 0,75$ (интервал 12061-12120 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 12061-12120 с – $K_{HF} = 1,06$ (интервал 12121-12180 с – стабильная работа технической системы).

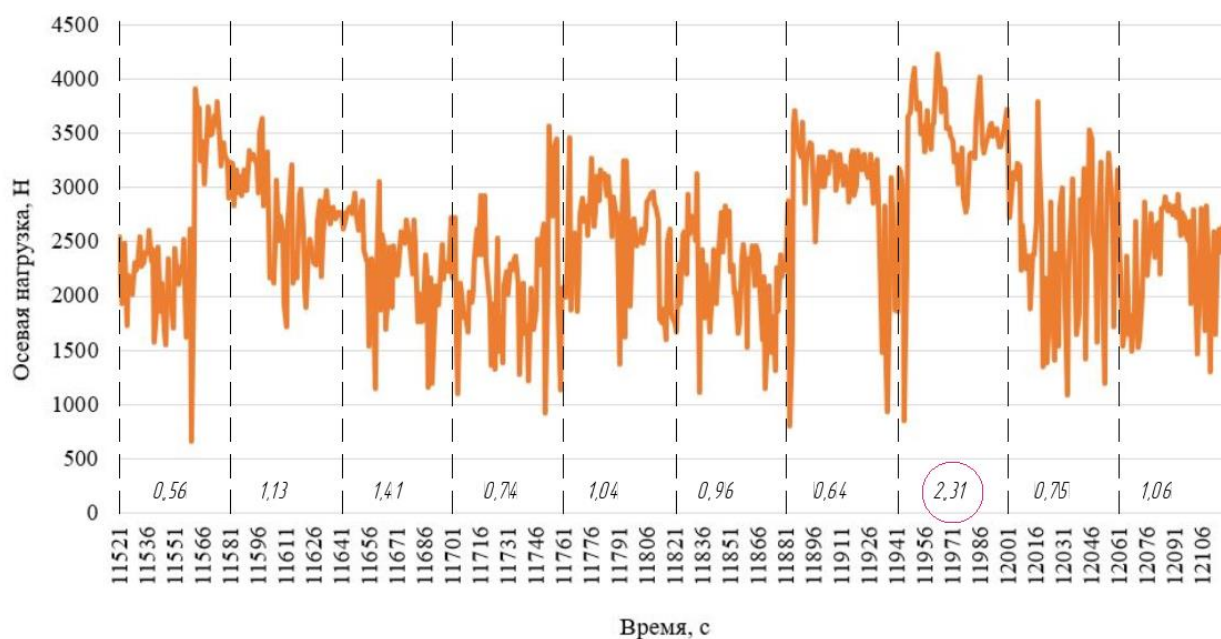


Рисунок 3.10 – Запись интервала колебаний осевой нагрузки по времени со значениями критерия диагностирования

Установлено, что при отключении датчиков значения критериев диагностирования равны 0,00. На Рисунке 3.11 и 3.12 изображены выбранные интервалы колебаний давления технологической жидкости и осевой нагрузки, соответственно.

Установлено, что спрогнозировать момент отключения датчиков замера осевой нагрузки заранее нельзя (интервал: 3721-4020 с) (Рисунок 3.11):

- на интервале 3481-3540 с – $K_{HF} = 1,12$ (интервал 3541-3600 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 3541-3600 с – $K_{HF} = 0,92$ (интервал 3601-3660 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 3601-3660 с – $K_{HF} = 1,57$ (интервал 3661-3720 с – нестабильная работа: износ фрезерного инструмента);
- на интервале 3661-3720 с – $K_{HF} = 0,00$ (интервал 3721-3780 с – отключение датчиков технической системы);
- на интервале 3721-3780 с – $K_{HF} = 0,00$ (интервал 3781-3840 с – отключение датчиков технической системы);

- на интервале 3781-3840 с – $K_{HF} = 0,00$ (интервал 3841-3900 с – отключение датчиков технической системы);
- на интервале 3841-3900 с – $K_{HF} = 0,00$ (интервал 3901-3960 с – отключение датчиков технической системы);
- на интервале 3901-3960 с – $K_{HF} = 0,00$ (интервал 3961-4020 с – отключение датчиков технической системы);
- на интервале 3961-4020 с – $K_{HF} = 0,84$ (интервал 4021-4080 с – стабильная работа технической системы).

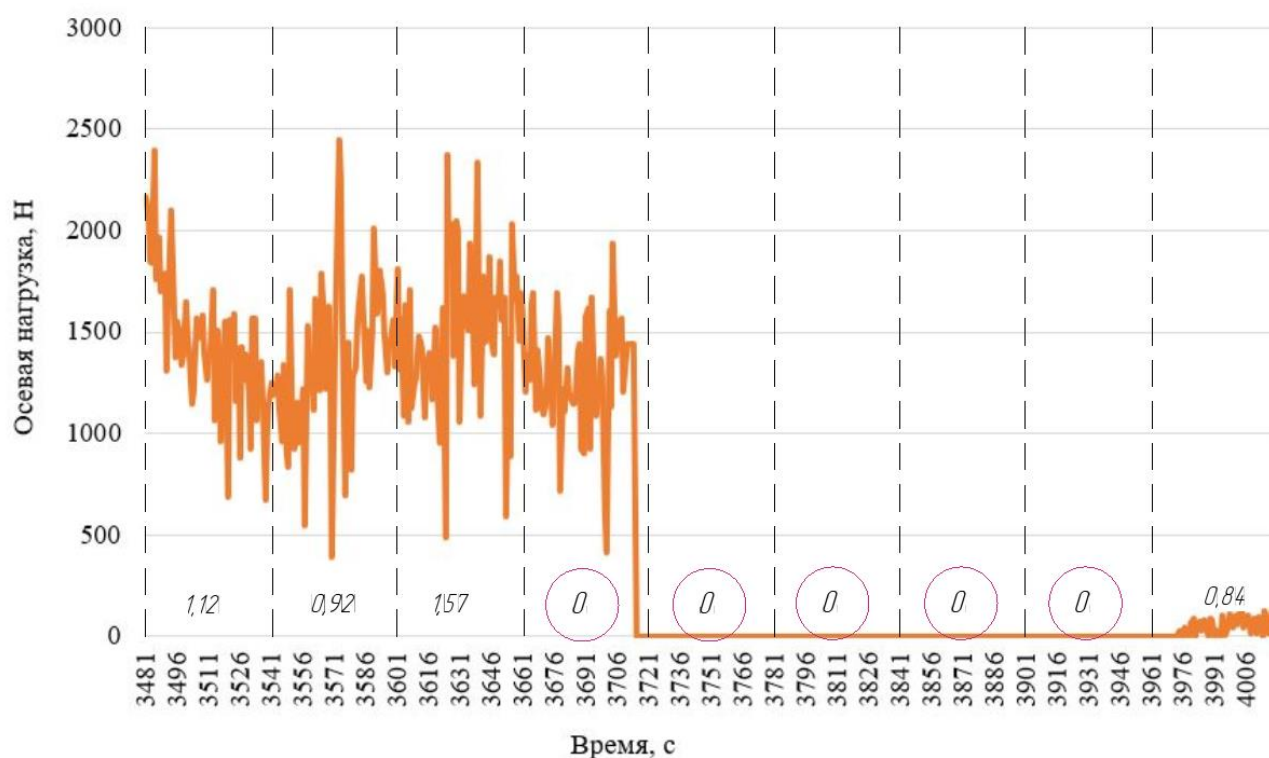


Рисунок 3.11 – Запись интервала колебаний осевой нагрузки по времени со значениями критерия диагностирования

Установлено, что спрогнозировать момент отключения датчиков замера давления технологической жидкости заранее нельзя (интервал: 6121-6660 с) (Рисунок 3.12):

- на интервале 6121-6180 с – $K_{HF} = 0,88$ (интервал 6181-6240 с – стабильная работа технической системы);

- на интервале 6181-6240 с – $K_{НР} = 0,66$ (интервал 6241-6300 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 6241-6300 с – $K_{НР} = 14,78$ (интервал 6301-6360 с – возможный отказ оборудования: заклинивание ВЗД);
- на интервале 6301-6360 с – $K_{НР} = 0,00$ (интервал 6361-6420 с – отключение датчиков технической системы);
- на интервале 6361-6420 с – $K_{НР} = 0,00$ (интервал 6421-6480 с – отключение датчиков технической системы);
- на интервале 6421-6480 с – $K_{НР} = 0,08$ (интервал 6481-6540 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 6481-6540 с – $K_{НР} = 1,24$ (интервал 6541-6600 с – нестабильная работа насосного оборудования);
- на интервале 6541-6600 с – $K_{НР} = 0,86$ (интервал 6601-6660 с – восстановление стабильной работы технической системы).

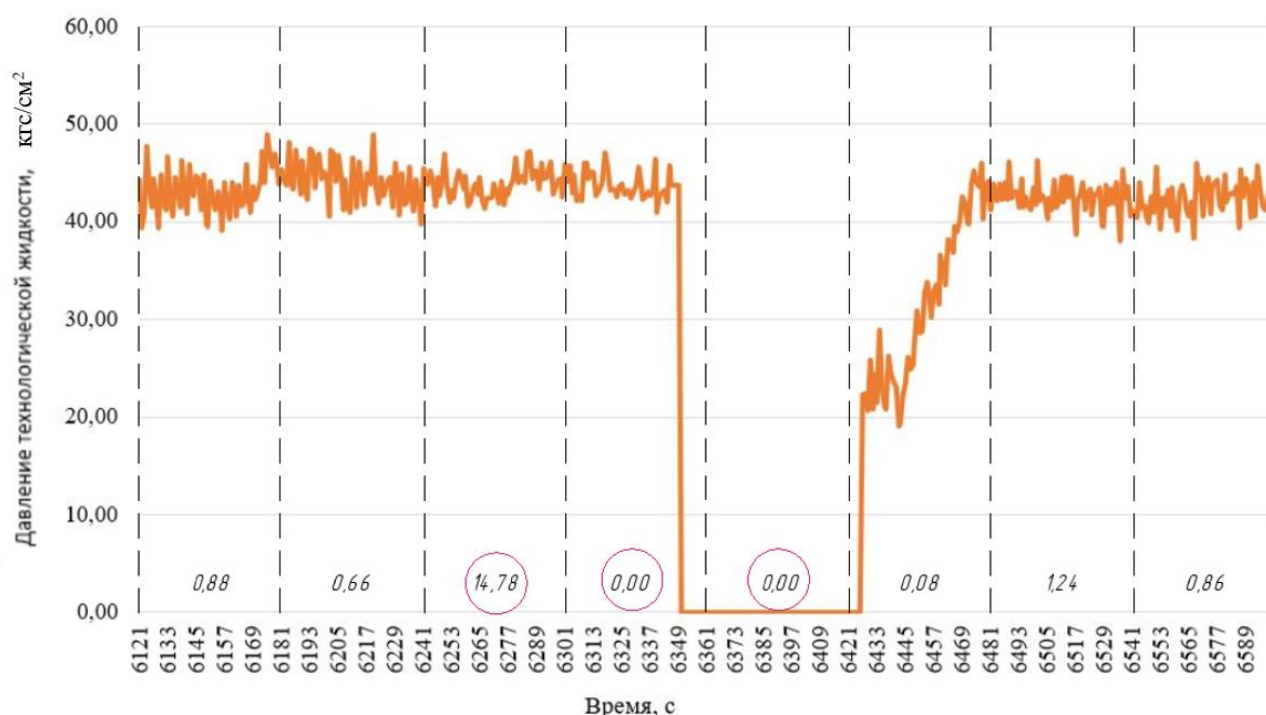


Рисунок 3.12 – Запись интервала колебаний давления технологической жидкости по времени со значениями критерия диагностирования

В ходе расчета проанализирован и обработан временной ряд процесса фрезерования «окна» ОК по колебаниям давления технологической жидкости и колебаниям осевой нагрузки, состоящий из 26851 значений с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с. Испытание проведено на стенде ООО «Перфобур» с фрезой диаметром 75 мм для ОК диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм и группой прочности Д. Установлено, что:

1) произведены расчеты с различным интервалом обработки, выявлено, что необходимый интервал вывода результатов 60 с, т.е. обработка происходит каждую минуту, так как при большем интервале происходит угнетение значений ряда;

2) контрольные значения критериев диагностирования:

- по колебаниям давления технологической жидкости: $K_{HP} > 1,6$;
- по колебаниям осевой нагрузки: $K_{HF} > 2,0$;

3) определены основные технологические ситуации для системы «ВЗД-ФИ», и критерии диагностирования, соответствующие им.

Испытание № 2.

В ходе расчета проанализирован и обработан временной ряд процесса фрезерования колонны по колебаниям давления технологической жидкости и колебаниям осевой нагрузки, состоящий из 15850 значений с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с. Для проведения испытания на стенде ООО «Перфобур» выбраны:

- 1) ОК диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм;
- 2) группа прочности материала ОК – Д;
- 3) ВЗД диаметром 54 мм;
- 4) фреза 6-ти лопастная диаметром 75 мм с цилиндрическими вставками ВК8 и наплавкой карбида вольфрама;

5) тип технологической жидкости – техническая вода с плотностью 1000 кг/м^3 (1 г/см^3).

Характеристика фрезерования:

- общее время фрезерования (без учета простоя) – 15850 с (4,4 ч);

- проходка (от нулевой точки подающего устройства) – 0,391 м (391 мм);
- максимальная осевая нагрузка – 2700 Н;
- общая наработка ВЗД – 363960 с (101,1 ч);
- максимальная скорость проходки – $6,25 \cdot 10^{-5}$ м/с (22,5 см/ч);
- минимальная скорость проходки – $1,67 \cdot 10^{-6}$ м/с (0,6 см/ч);
- средняя скорость проходки – $2,47 \cdot 10^{-5}$ м/с (8,9 см/ч);
- максимальный перепад давления на ВЗД – 0,7 МПа (7 кгс/см²).

После испытаний диаметр фрезы не изменился, но отмечено, что цилиндрические вставки из ВК8 поломались и откололись (Рисунок 3.13). В процессе испытаний профрезеровать ОК 146 мм фрезой не получилось, при этом она вскрыта до цемента (Рисунок 3.14). Глубина износа по накладке 3 мм, видны следы работы вставок из ВК8.



Рисунок 3.13 – Фреза после испытания



Рисунок 3.14 – Профрезерованное «окно» в ОК

При испытании зарегистрированы повышенный шум и вибрации, установлена следующая технологическая ситуация:

- износ фрезерного инструмента на интервалах 9420-10020, 10920-11820, 11940-15840 с.

Установлено, что во время фрезерования колонны наблюдалось снижение давления из-за износа фрезерного инструмента при этом критерий диагностирования по давлению постепенно увеличивался.

На Рисунке 3.15 изображен график записи значений осевой нагрузки на фрезерный инструмент во время фрезерования ОК. По результатам испытаний известно, что происходило понижение нагрузки и падение проходки, при этом в конце испытания фреза оказалась изношена на 60-70 %.

На Рисунке 3.16 изображен график записи значений давления технологической жидкости во время фрезерования ОК. По результатам испытаний известно, что во время работы отключение установки происходило один раз.

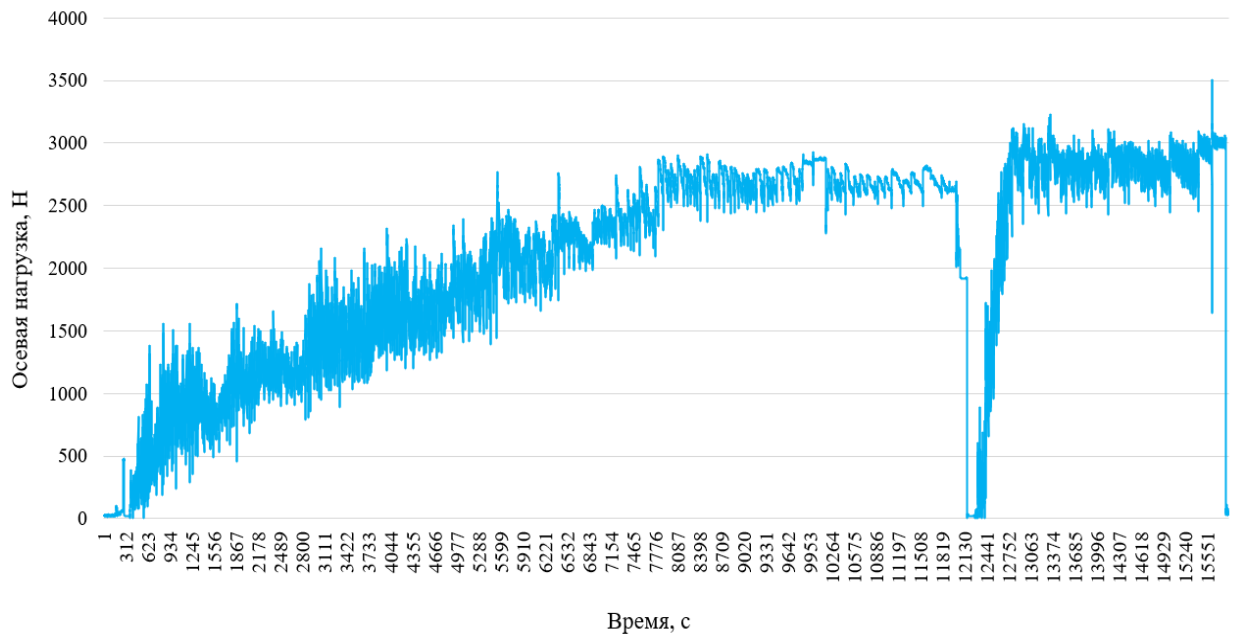


Рисунок 3.15 – Запись колебаний осевой нагрузки по времени

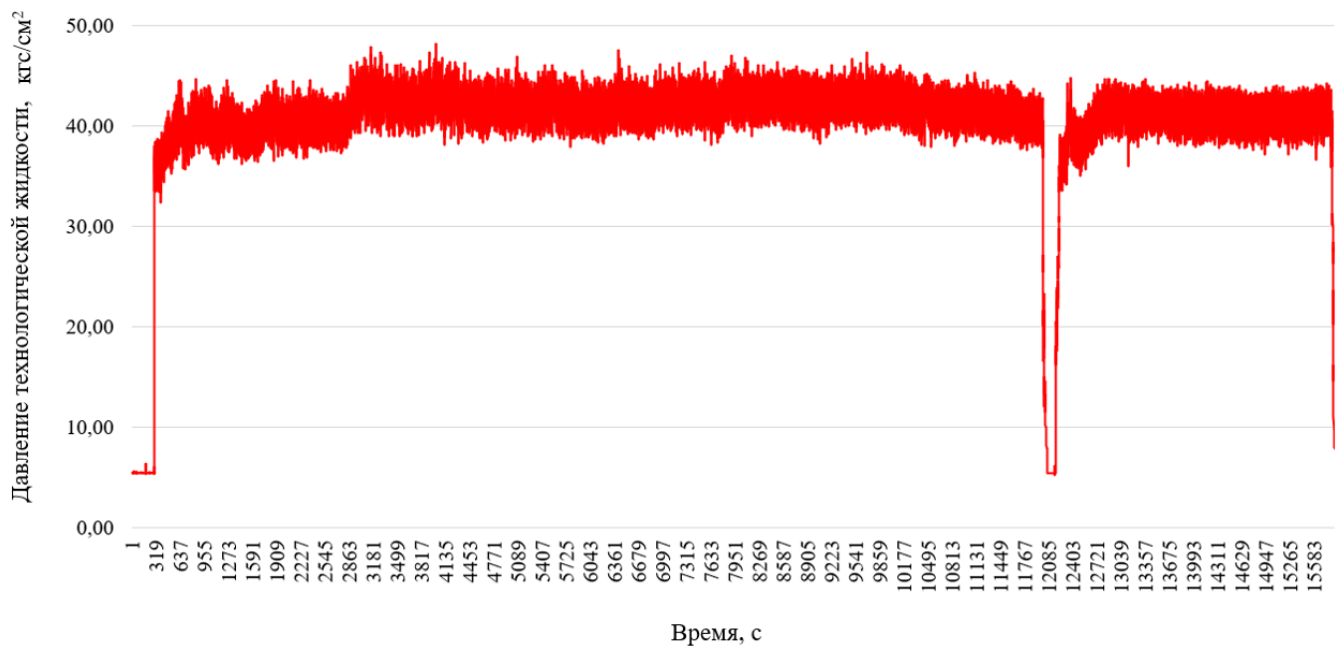


Рисунок 3.16 – Запись колебаний давления технологической жидкости по времени

В ходе испытания по фрезерованию ОК диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм и группой прочности материала – Д, установлены следующие значения критериев диагностирования:

1 По колебаниям давления технологической жидкости:

- $K_{НР} \leq 1,1$ – работа технической системы в следующем интервале – стабильная;

- $1,1 < K_{НР} \leq 1,6$ – работа технической системы в следующем интервале – нестабильная;

- $K_{НР} > 1,6$ – вероятный отказ оборудования в следующем интервале.

2 По колебаниям осевой нагрузки:

- $K_{HF} \leq 1,4$ – работа технической систем в следующем интервале – стабильная;

- $1,4 < K_{HF} \leq 2,0$ – работа технической систем в следующем интервале – нестабильная;

- $K_{HF} > 2,0$ – вероятный отказ оборудования в следующем интервале.

В ходе испытания установлено несколько технологических ситуаций системы «ВЗД-ФИ» и соответствующие им значения критериев диагностирования:

1 Возможный отказ: заклинивание ВЗД: $K_{HF} > 2,0$ и $K_{НР} > 1,6$.

2 Возможный отказ: подклинивание ВЗД: $K_{HF} > 2,0$ или $K_{НР} > 1,6$.

3 Нестабильная работа: износ фрезерного инструмента: $1,4 < K_{HF} \leq 2,0$ и $K_{НР} < 1,1$.

4 Нестабильная работа насосного оборудования: $K_{HF} < 1,4$ и $1,1 < K_{НР} \leq 1,6$.

5 Нестабильная работа технической системы: $1,4 < K_{HF} \leq 2,0$ и $1,1 < K_{НР} \leq 1,6$.

6 Стабильная работа технической системы: $K_{HF} < 1,4$ и $K_{НР} < 1,1$.

На Рисунке 3.17 изображен выбранный интервал колебаний осевой нагрузки в процессе фрезерования ОК с 10741 до 12360 с. Установлено, что во время фрезерования колонны наблюдались частые скачки по осевой нагрузке из-за износа фрезерного инструмента при этом критерий диагностирования по нагрузке, изменялся неравномерно:

- на интервале 10741-10800 с – $K_{HF} = 0,48$ (интервал 10801-10860 с – стабильная работа технической системы);

- на интервале 10801-10860 с – $K_{HF} = 2,20$ (интервал 10861-10920 с – возможный отказ оборудования: подклинивание ВЗД);

- на интервале 10861-10920 с – $K_{HF} = 0,69$ (интервал 10921-10980 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 10921-10980 с – $K_{HF} = 1,84$ (интервал 10981-11040 с – нестабильная работа: износ фрезерного инструмента);
- на интервале 10981-11040 с – $K_{HF} = 0,34$ (интервал 11041-11100 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 11041-11100 с – $K_{HF} = 0,89$ (интервал 11101-11160 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11101-11160 с – $K_{HF} = 1,51$ (интервал 11161-11220 с – нестабильная работа: износ фрезерного инструмента);
- на интервале 11161-11220 с – $K_{HF} = 1,24$ (интервал 11221-11280 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 11221-11280 с – $K_{HF} = 0,38$ (интервал 11281-11340 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11281-11340 с – $K_{HF} = 5,63$ (интервал 11341-11400 с – возможный отказ оборудования: подклинивание ВЗД);
- на интервале 11341-11400 с – $K_{HF} = 0,40$ (интервал 11401-11460 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 11401-11460 с – $K_{HF} = 0,68$ (интервал 11461-11520 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11461-11520 с – $K_{HF} = 5,23$ (интервал 11521-11580 с – возможный отказ оборудования: подклинивание ВЗД);
- на интервале 11521-11580 с – $K_{HF} = 0,10$ (интервал 11581-11640 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 11581-11640 с – $K_{HF} = 2,24$ (интервал 11641-11700 с – возможный отказ оборудования: подклинивание ВЗД);
- на интервале 11641-11700 с – $K_{HF} = 0,67$ (интервал 11701-11760 с – восстановление стабильной работы технической системы);

- на интервале 11701-11760 с – $K_{HF} = 2,96$ (интервал 11761-11820 с – возможный отказ оборудования: подклинивание ВЗД);
- на интервале 11761-11820 с – $K_{HF} = 0,56$ (интервал 11821-11880 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 11821-11880 с – $K_{HF} = 0,40$ (интервал 11881-11920 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11881-11920 с – $K_{HF} = 0,95$ (интервал 11941-12000 с – стабильная работа технической системы);
- на интервале 11941-12000 с – $K_{HF} = 24,00$ (интервал 12001-12060 с – возможный отказ оборудования: заклинивание ВЗД);
- на интервале 12001-12060 с – $K_{HF} = 0,14$ (интервал 12061-12120 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 12061-12120 с – $K_{HF} = 65,37$ (интервал 12121-12180 с – возможный отказ оборудования: заклинивание ВЗД);
- на интервале 12121-12180 с – $K_{HF} = 0,06$ (интервал 12181-12240 с – восстановление стабильной работы технической системы);
- на интервале 12181-12240 с – $K_{HF} = 5,39$ (интервал 12241-12300 с – возможный отказ оборудования: подклинивание ВЗД);
- на интервале 12241-12300 с – $K_{HF} = 2,76$ (интервал 12301-12360 с – возможный отказ оборудования: подклинивание ВЗД);
- на интервале 12301-12360 с – $K_{HF} = 1,00$ (интервал 12361-12420 с – восстановление стабильной работы технической системы).

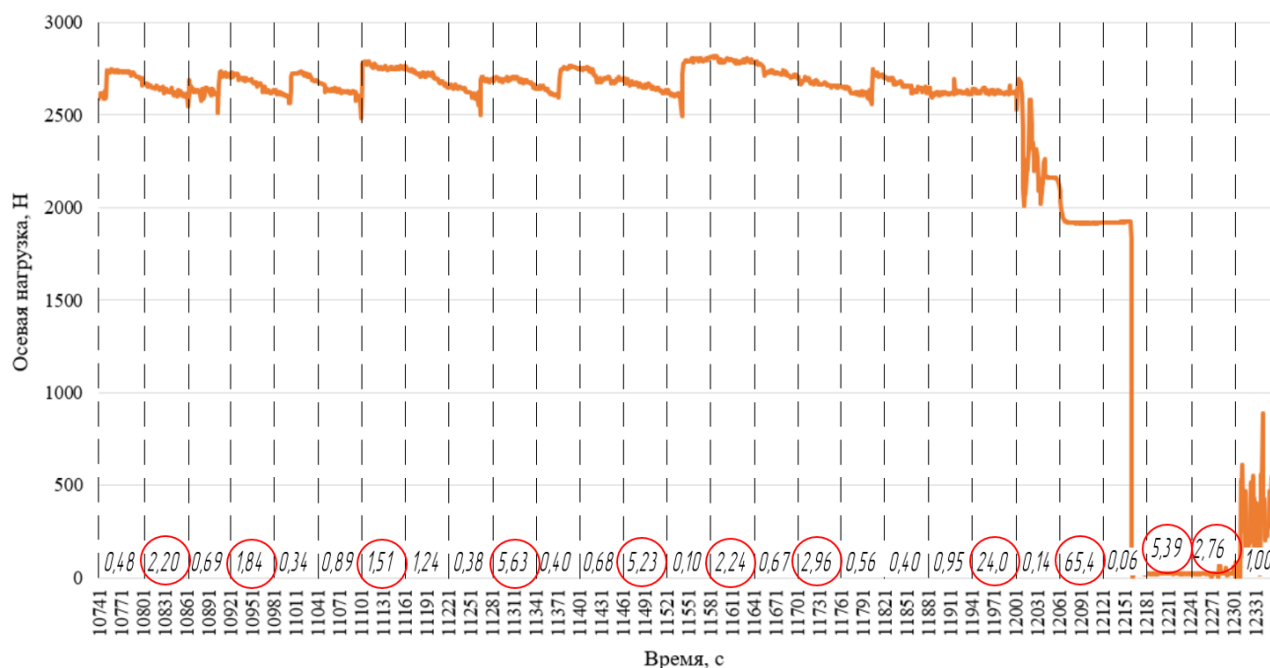


Рисунок 3.17 – Запись интервала колебаний осевой нагрузки по времени со значениями критерия диагностирования

В ходе расчета проанализирован и обработан временной ряд процесса фрезерования ОК по колебаниям давления технологической жидкости и колебаниям осевой нагрузки, состоящий из 15850 значений с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с. Испытание проведено на стенде ООО «Перфобур» с фрезой диаметром 75 мм для ОК диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм и группой прочности Д. Установлено, что:

1) контрольные значения критериев диагностирования:

- по колебаниям давления технологической жидкости: $K_{HP} > 1,6$;
- по колебаниям осевой нагрузки: $K_{HF} > 2,0$;

2) в момент вероятностного отказа оборудования, в данном случае подклинивание ВЗД, вызывающее износ фрезы, наблюдается увеличение значения критерия до контрольного, в результате чего в конце испытания фреза изношена на 60 % и пробурить цементно-песчаный блок после фрезерования окна не получилось;

3) определены основные технологические ситуации для системы «ВЗД-ФИ», а также критерии диагностирования, соответствующие им.

Испытание №3.

В ходе работы проанализирован и обработан временной ряд процесса фрезерования «окна» в ОК по колебаниям давления технологической жидкости и колебаниям осевой нагрузки на фрезерный инструмент, состоящий из 45393 значений с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с. Для проведения испытания на стенде ООО «Перфобур» выбраны:

- 1) ОК диаметром 178 мм с толщиной стенки 10,8 мм;
- 2) группа прочности материала ОК – Е;
- 3) ВЗД диаметром 54 мм (с углом перекося 2°);
- 4) фреза диаметром 82 мм с крошкой из дробленного карбида вольфрама;
- 5) тип технологической жидкости – техническая вода с плотностью 1000 кг/м^3 (1 г/см^3).

Характеристика фрезерования:

- общее время фрезерования (без учета простоя) – 45393 с (12,9 ч);
- проходка (от нулевой точки подающего устройства) – 0,950 м (950 мм);
- максимальная осевая нагрузка – 3000 Н;
- общая наработка ВЗД – 45390 с (12,9 ч);
- максимальная скорость проходки – $5,00 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ (18,00 см/ч);
- минимальная скорость проходки – $2,78 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ (1,00 см/ч);
- средняя скорость проходки – $1,75 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ (6,30 см/ч);
- максимальный перепад давления на ВЗД – 2,9 МПа (29 кгс/см²).

После испытаний диаметр фрезы составляет 81 мм. Длина отфрезерованного «окна» составляет 30 мм. Глубина снятия металла по накладке составляет 1-2 мм. В процессе испытаний удалось профрезеровать «окно» в ОК 178 мм. По подающему устройству пройдено 950 мм (согласно размеру толкателя, применяемого при бурении радиального канала радиусом кривизны 17 м). Фрезерный инструмент за ОК не вышел, работа торцом неполная.

Во время испытания установлена следующая технологическая ситуация:

- нестабильная работа насосного оборудования в процессе фрезерования с 1060 с до 32581 с.

Установлено, что во время фрезерования ОК присутствовали скачки давления технологической жидкости и зарегистрирована нестабильная работа насосного оборудования.

На Рисунке 3.18 изображен график записи значений осевой нагрузки за всё время испытания. По результатам известно, что во время работы происходили подклинивания и заклинивание ВЗД, отключение установки производилось четыре раза.

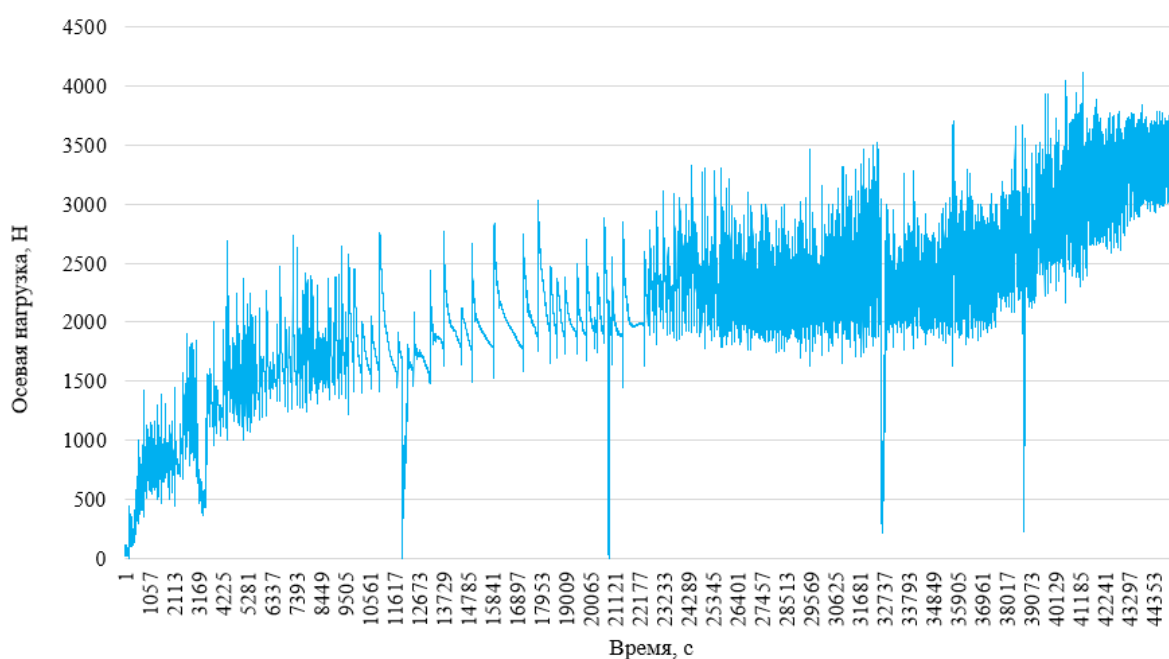


Рисунок 3.18 – Запись колебаний осевой нагрузки по времени фрезерования

На Рисунке 3.19 изображен график записи значений давления технологической жидкости за всё время испытания. По результатам известно, что во время работы происходили подклинивания и заклинивание ВЗД, а также один раз происходила остановка насоса и его ремонт из-за неравномерной подачи. Неравномерная работа насоса наблюдалась до интервала 32581 с.

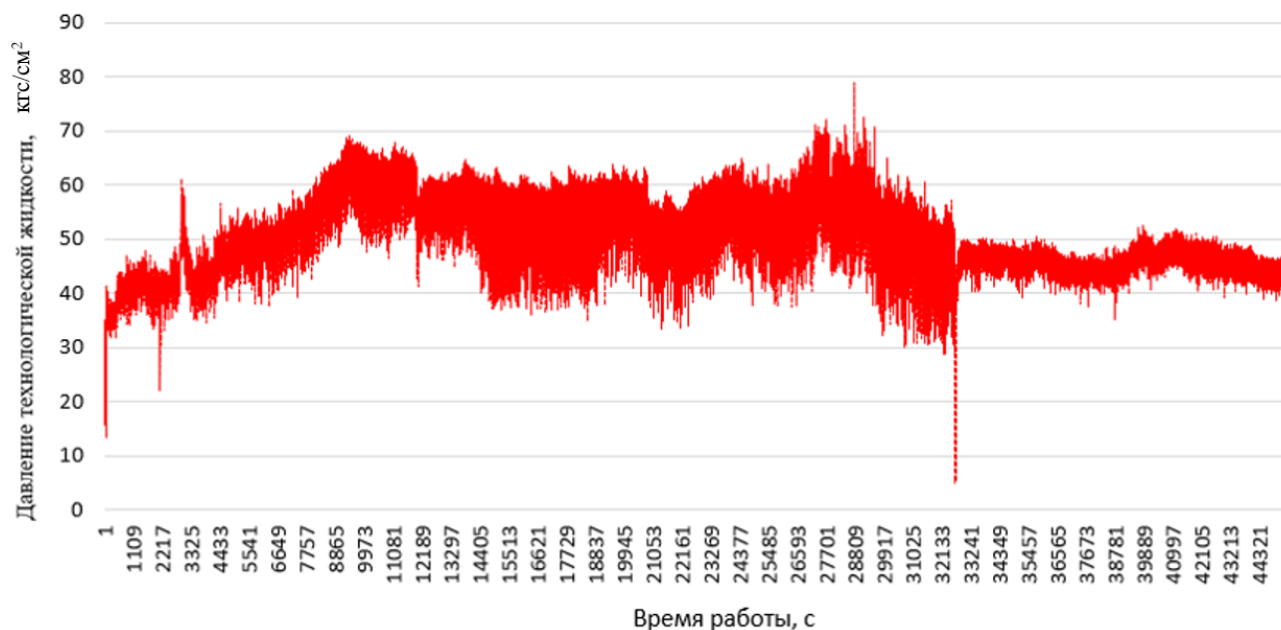


Рисунок 3.19 – Запись колебаний давления технологической жидкости по времени

В ходе испытания по фрезерованию ОК диаметром 178 мм с толщиной стенки 10,8 мм и группой прочности материала – Е, установлены следующие значения критериев диагностирования:

1 По колебаниям давления технологической жидкости:

- $K_{HP} \leq 1,1$ – работа технической системы в следующем интервале – стабильная;
- $1,1 < K_{HP} \leq 1,9$ – работа технической системы в следующем интервале – нестабильная;
- $K_{HP} > 1,9$ – вероятный отказ оборудования в следующем интервале.

2 По колебаниям осевой нагрузки:

- $K_{HF} \leq 1,4$ – работа технической системы в следующем интервале – стабильная;
- $1,4 < K_{HF} \leq 3,5$ – работа технической системы в следующем интервале – нестабильная;
- $K_{HF} > 3,5$ – вероятный отказ оборудования в следующем интервале.

Установлено несколько технологических ситуаций системы «ВЗД-ФИ» и соответствующие им значения критериев диагностирования:

- 1 Возможный отказ: заклинивание ВЗД: $K_{HF} > 3,5$ и $K_{HP} > 1,9$.
- 2 Возможный отказ: подклинивание ВЗД: $K_{HF} > 3,5$ или $K_{HP} > 1,9$.
- 3 Нестабильная работа: износ фрезерного инструмента: $1,4 < K_{HF} \leq 3,5$ и $K_{HP} < 1,1$.
- 4 Нестабильная работа насосного оборудования: $K_{HF} < 1,4$ и $1,1 < K_{HP} \leq 1,9$.
- 5 Нестабильная работа технической системы: $1,4 < K_{HF} \leq 3,5$ и $1,1 < K_{HP} \leq 1,9$.
- 6 Стабильная работа технической системы: $K_{HF} < 1,4$ и $K_{HP} < 1,1$.

В ходе расчета проанализирован и обработан временной ряд процесса фрезерования ОК по колебаниям давления технологической жидкости и колебаниям осевой нагрузки, состоящий из 45393 значений с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с. Испытание проведено на стенде ООО «Перфобур» с фрезой диаметром 82 мм для ОК диаметром 178 мм с толщиной стенки 10,8 мм и группой прочности Е. Установлено, что:

- 1) контрольные значения критериев диагностирования:
 - по колебаниям давления технологической жидкости: $K_{HP} > 1,9$;
 - по колебаниям осевой нагрузки: $K_{HF} > 3,5$;
- 2) установлено, что нестабильная работа насосного оборудования наблюдалась до момента остановки технической системы и последующего ремонта насоса;
- 3) определены основные технологические ситуации для системы «ВЗД-ФИ», а также критерии диагностирования, соответствующие им.

Испытание № 4.

Для расчета проанализирован и обработан временной ряд процесса фрезерования колонны по колебаниям давления технологической жидкости и колебаниям осевой нагрузки, состоящий из 27301 значений с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с. Для проведения испытания на стенде ООО «Перфобур» выбраны:

- 1) ОК диаметром 245 мм с толщиной стенки 8,5 мм;
- 2) группа прочности материала ОК – Д;
- 3) ВЗД диаметром 54 мм;
- 4) фреза диаметром 75 мм с дробленными частями карбида вольфрама;
- 5) тип технологической жидкости – техническая вода с плотностью 1000 кг/м^3 (1 г/см^3).

Характеристика фрезерования:

- общее время фрезерования (без учета простоя) – 27301 с (7,7 ч);
- проходка (от нулевой точки подающего устройства) – 0,85 м (850 мм);
- максимальная осевая нагрузка – 2900 Н;
- общая наработка ВЗД – 325080 с (90,3 ч);
- максимальная скорость проходки – $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ (60,0 см/ч);
- минимальная скорость проходки – $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ (0,6 см/ч);
- средняя скорость проходки – $2,33 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ (8,4 см/ч);
- максимальный перепад давления на ВЗД – 1,2 МПа (12 кгс/см²).

После испытаний по фрезерованию ОК 245 мм диаметр фрезы не изменился. Глубина износа по накладке – 3 мм. Пройдена вся длина накладки.

Установлено, что во время фрезерования ОК присутствовали скачки осевой нагрузки, в том числе связанные с заклиниванием ВЗД, но при этом работу фрезерного инструмента, можно считать стабильной, так как пройдена вся длина накладки.

На Рисунке 3.20 изображен график записи значений осевой нагрузки за всё время фрезерования колонны. По результатам испытаний известно, что во время работы происходило заклинивание ВЗД и отключение установки два раза.

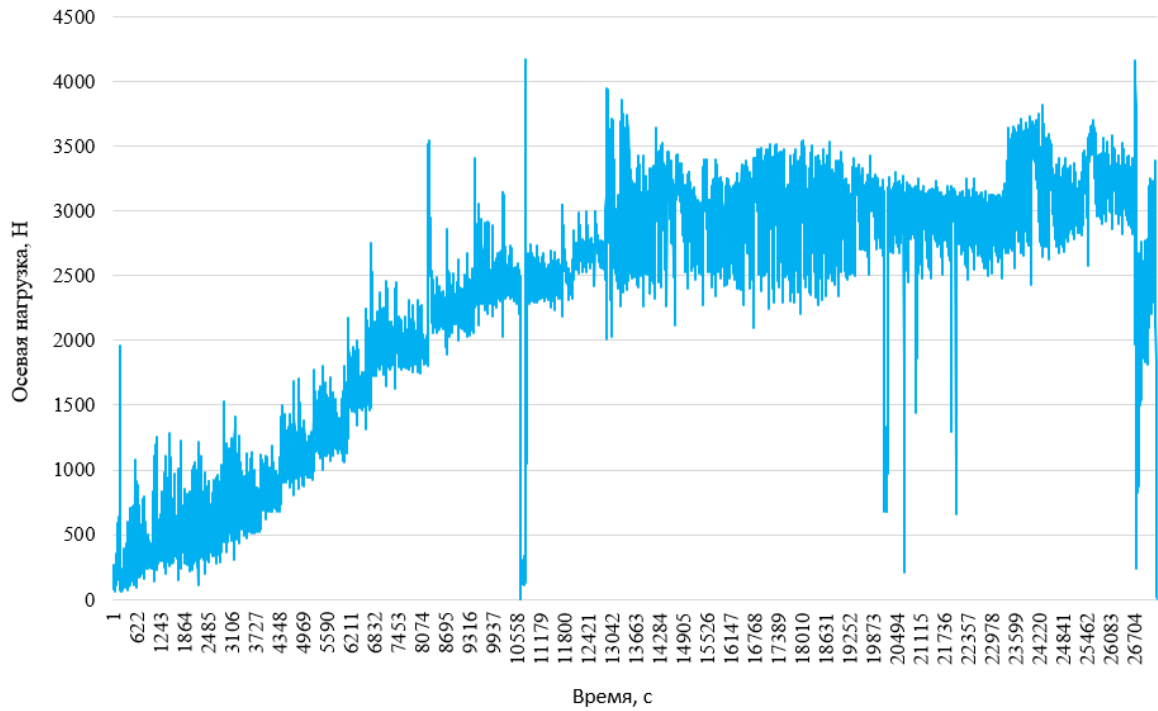


Рисунок 3.20 – Запись колебаний осевой нагрузки по времени

На Рисунке 3.21 изображен график записи значений давления технологической жидкости по времени фрезерования колонны. По результатам испытаний известно, что во время работы отключение установки происходило два раза.

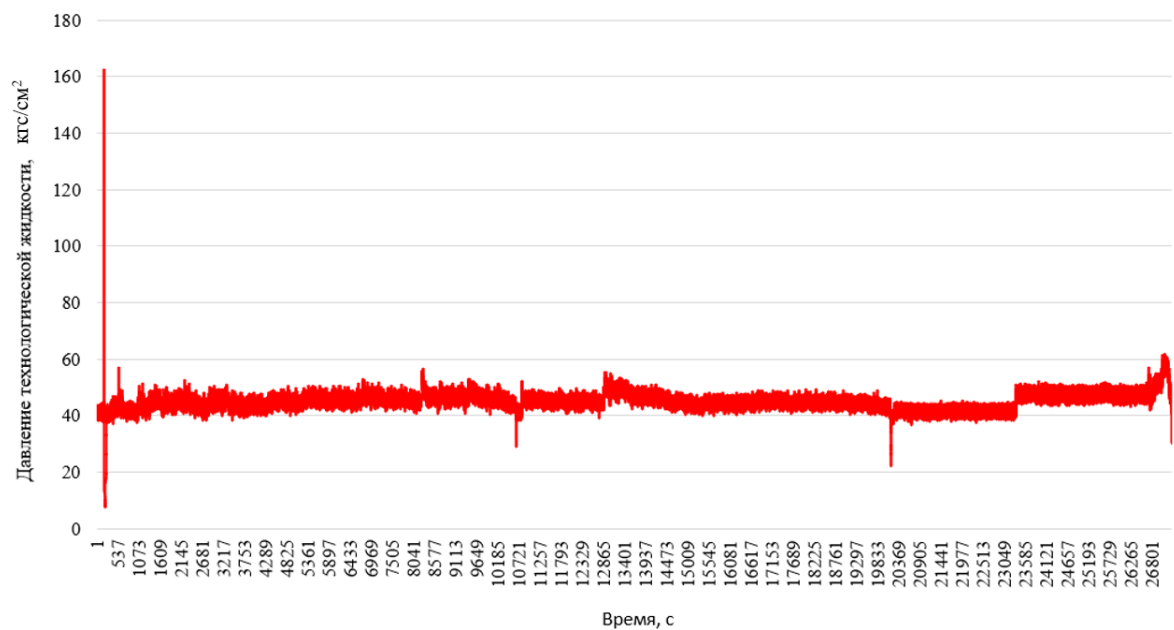


Рисунок 3.21 – Запись колебаний давления технологической жидкости по времени

В ходе испытания по фрезерованию ОК диаметром 245 мм с толщиной стенки 8,5 мм и группой прочности материала – Д, установлены следующие значения критериев диагностирования:

1 По колебаниям давления технологической жидкости:

- $K_{НР} \leq 1,1$ – работа технической системы в следующем интервале – стабильная;
- $1,1 < K_{НР} \leq 2,8$ – работа технической системы в следующем интервале – нестабильная;
- $K_{НР} > 2,8$ – вероятный отказ оборудования в следующем интервале.

2 По колебаниям осевой нагрузки:

- $K_{HF} \leq 1,4$ – работа технической системы в следующем интервале – стабильная;
- $1,4 < K_{HF} \leq 3,0$ – работа технической системы в следующем интервале – нестабильная;
- $K_{HF} > 3,0$ – вероятный отказ оборудования в следующем интервале.

В ходе испытания установлено несколько технологических ситуаций системы «ВЗД-ФИ» и соответствующие им значения критериев диагностирования:

- 1 Возможный отказ: заклинивание ВЗД: $K_{HF} > 3,0$ и $K_{НР} > 2,8$.
- 2 Возможный отказ: подклинивание ВЗД: $K_{HF} > 3,0$ или $K_{НР} > 2,8$.
- 3 Нестабильная работа: износ фрезерного инструмента: $1,4 < K_{HF} \leq 3,0$ и $K_{НР} < 1,1$.
- 4 Нестабильная работа насосного оборудования: $K_{HF} < 1,4$ и $1,1 < K_{НР} \leq 2,8$.
- 5 Нестабильная работа технической системы: $1,4 < K_{HF} \leq 3,0$ и $1,1 < K_{НР} \leq 2,8$.
- 6 Стабильная работа технической системы: $K_{HF} < 1,4$ и $K_{НР} < 1,1$.

В ходе расчета проанализирован и обработан временной ряд процесса фрезерования колонны по колебаниям давления технологической жидкости и колебаниям осевой нагрузки, состоящий из 27301 значений с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с. Испытание проведено на стенде ООО «Перфобур» с фрезой

диаметром 75 мм для ОК диаметром 245 мм с толщиной стенки 8,5 мм и группой прочности Д. Установлено, что:

1) контрольные значения критериев диагностирования:

- по колебаниям давления технологической жидкости: $K_{HP} > 2,8$;
- по колебаниям осевой нагрузки: $K_{HF} > 3,0$;

2) определены основные технологические ситуации для системы «ВЗД-ФИ», а также критерии диагностирования, соответствующие им.

Испытание № 5.

Для расчета проанализирован и обработан временной ряд процесса фрезерования колонны по колебаниям давления технологической жидкости и колебаниям осевой нагрузки, состоящий из 24730 значений с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с. Для проведения испытания на стенде ООО «Перфобур» выбраны:

- 1) ОК с диаметром 168 мм с толщиной стенки 9,5 мм, группа прочности – Д;
- 2) ВЗД диаметром 49 мм;
- 3) фреза диаметром 75 мм с карбидом вольфрама и PDC зубками-вставками;
- 4) тип технологической жидкости – техническая вода с плотностью 1000 кг/м^3 (1 г/см^3).

Характеристика фрезерования:

- общее время фрезерования (без учета простоя) – 25200 с (7,0 ч);
- проходка (от нулевой точки подающего устройства) – 0,73 м (730 мм);
- максимальная осевая нагрузка – 2000 Н;
- общая наработка ВЗД – 151200 с (42,0 ч);
- максимальная скорость проходки – $5,9 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ (21,4 см/ч);
- минимальная скорость проходки – $8,3 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ (3 см/ч);
- средняя скорость проходки – $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ (6,6 см/ч);
- максимальный перепад давления на ВЗД – 2,2 МПа (22 кгс/см²).

После испытаний по фрезерованию ОК 168 мм диаметр фрезы составляет 74,8-75 мм. Полноразмерная длина вырезанного «окна» составила 380 мм. Глубина износа по накладке – 3 мм. Пройдена вся длина накладки.

При проведении испытания возникали проблемы с нагружением фрезы, вследствие чего происходили частые заклинки ВЗД. Во время испытания установлены следующие технологические ситуации:

- заклинивание ВЗД происходило в интервалах: 3480-4140 с, 16620-17520 с, 8720-20220 с, 20220-21600 с;
- подклинивание ВЗД происходило в интервалах: 14220-14820 с, 14820-16620 с.

Фреза имеет агрессивное вооружение, поэтому из-за резкой подачи происходили заклинивания и большое число подклиниваний ВЗД. В процессе испытаний фреза в целом показала высокую стойкость вооружения. Визуально степень износа бурсплава низкая. На торце фрезы площадь бурсплава незначительная, поэтому произошел износ самого тела фрезы, но центральные PDC пластины не были задеты.

Установлено, что во время фрезерования ОК присутствовали скачки осевой нагрузки, в том числе связанные с заклиниваниями и большим числом подклиниваний ВЗД.

На Рисунках 3.22, 3.23 изображены графики записи значений осевой нагрузки и давления технологической жидкости по времени фрезерования колонны, соответственно. По результатам испытаний известно, что во время работы происходило заклинивание и подклинивание ВЗД, отключение установки один раз.

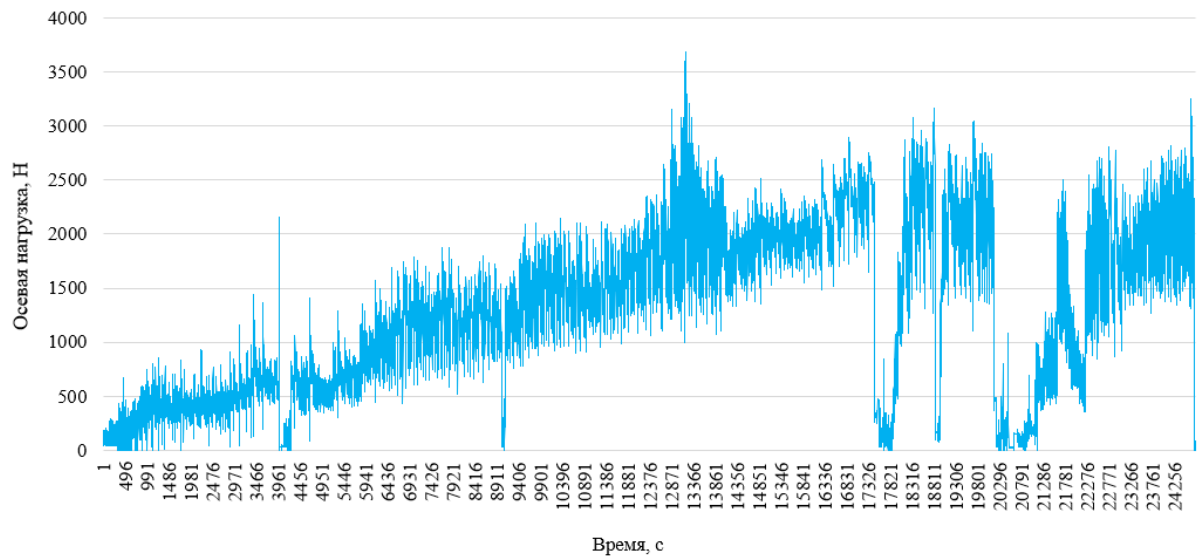


Рисунок 3.22 – Запись колебаний осевой нагрузки по времени

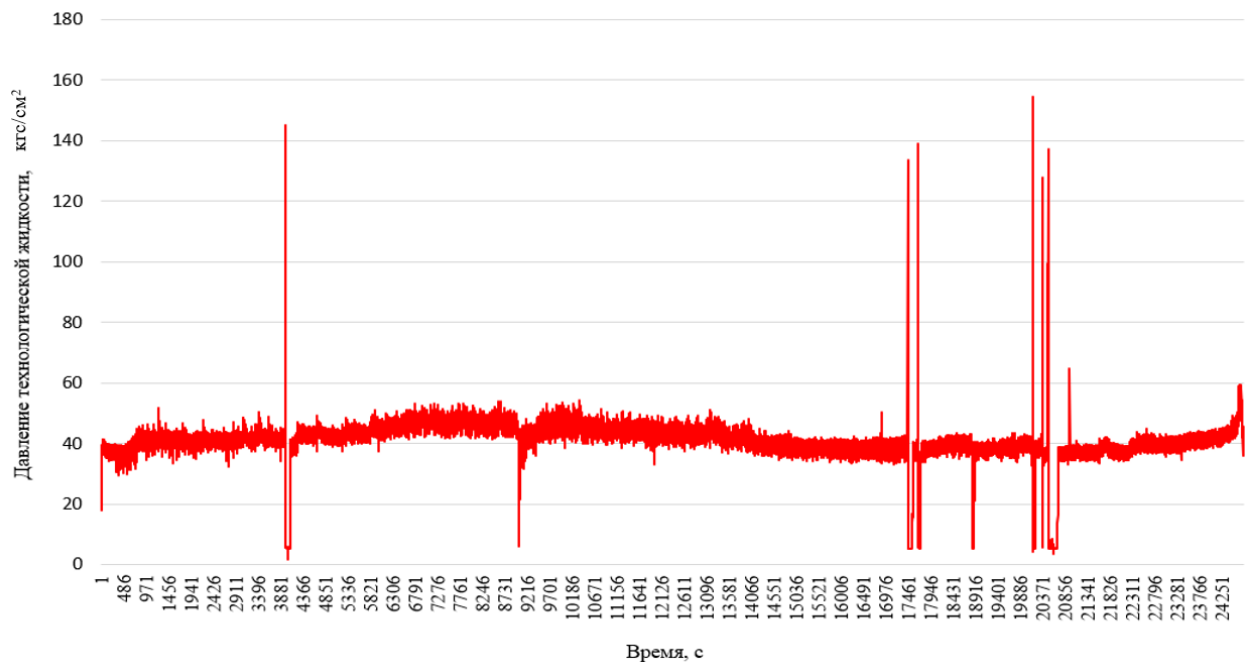


Рисунок 3.23 – Запись колебаний давления технологической жидкости по времени

В ходе испытания по фрезерованию ОК диаметром 168 мм с толщиной стенки 9,5 мм и группой прочности материала – Д, установлены следующие значения критериев диагностирования:

1 По колебаниям давления технологической жидкости:

- $K_{НР} \leq 1,1$ – работа технической системы в следующем интервале – стабильная;

- $1,1 < K_{HP} \leq 1,7$ – работа технической системы в следующем интервале – нестабильная;

- $K_{HP} > 1,7$ – вероятный отказ оборудования в следующем интервале.

2 По колебаниям осевой нагрузки:

- $K_{HF} \leq 1,4$ – работа технической системы в следующем интервале – стабильная;

- $1,4 < K_{HF} \leq 2,5$ – работа технической системы в следующем интервале – нестабильная;

- $K_{HF} > 2,5$ – вероятный отказ оборудования в следующем интервале.

В ходе испытания установлено несколько технологических ситуаций системы «ВЗД-ФИ» и соответствующие им значения критериев диагностирования:

1 Возможный отказ: заклинивание ВЗД: $K_{HF} > 2,5$ и $K_{HP} > 1,7$.

2 Возможный отказ: подклинивание ВЗД: $K_{HF} > 2,5$ или $K_{HP} > 1,7$.

3 Нестабильная работа: износ фрезерного инструмента: $1,4 < K_{HF} \leq 2,5$ и $K_{HP} < 1,1$.

4 Нестабильная работа насосного оборудования: $K_{HF} < 1,4$ и $1,1 < K_{HP} \leq 1,7$.

5 Нестабильная работа технической системы: $1,4 < K_{HF} \leq 2,5$ и $1,1 < K_{HP} \leq 1,7$.

6 Стабильная работа технической системы: $K_{HF} < 1,4$ и $K_{HP} < 1,1$.

В ходе расчета проанализирован и обработан временной ряд процесса фрезерования колонны по колебаниям давления технологической жидкости и колебаниям осевой нагрузки, состоящий из 24730 значений с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с. Испытание проведено на стенде ООО «Перфобур» с фрезой диаметром 75 мм для ОК диаметром 168 мм с толщиной стенки 9,5 мм и группой прочности Д. Установлено, что:

1) контрольные значения критериев диагностирования:

- по колебаниям давления технологической жидкости: $K_{HP} > 1,7$;

- по колебаниям осевой нагрузки: $K_{HF} > 2,5$.

2) определены основные технологические ситуации для системы «ВЗД-ФИ», а также критерии диагностирования, соответствующие им.

В Таблицу 3.6 сведены все результаты расчетов критериев диагностирования $K_{НР}$ и $K_{НФ}$ для различных типов ФИ и ОК.

Таблица 3.6 – Результаты расчетов контрольных значений критериев диагностирования

Характеристики ФИ	Характеристики ОК	Контрольные $K_{НР\text{контрол}}$ и $K_{НФ\text{контрол}}$	Технологическая ситуация и соответствующие критерии $K_{НР}$ и $K_{НФ}$,
Диаметр – 75 мм, 3-х лопастная с твердосплавной крошкой и твердосплавными пластинами	- диаметр 146 мм; - толщина стенки 8 мм; - группа прочности: Д	- $K_{НР\text{контрол}} > 1,6$ - $K_{НФ\text{контрол}} > 2,0$	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	- $K_{НР\text{контрол}} > 1,6$ - $K_{НФ\text{контрол}} > 2,0$	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	- $K_{НР\text{контрол}} > 1,7$ - $K_{НФ\text{контрол}} > 2,5$	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 3.6

Характеристики ФИ	Характеристики ОК	Контрольные $K_{НР\text{контрол}}$ и $K_{НФ\text{контрол}}$	Технологическая ситуация и соответствующие критерии $K_{НР}$ и $K_{НФ}$,
Диаметр – 82 мм, с дробленным карбидом вольфрама	- диаметр 178 мм; - толщина стенки 10,8 мм; - группа прочности: E	- $K_{НР\text{контрол}} > 1,9$ - $K_{НФ\text{контрол}} > 3,5$	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	- $K_{НР\text{контрол}} > 2,8$ - $K_{НФ\text{контрол}} > 3,0$	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.

3.3 Автоматизированная программа определения технического состояния технической системы «ВЗД-ФИ» в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне

Для своевременного мониторинга технического состояния системы «ВЗД-ФИ» в процессе фрезерования «окна» в ОК создана программа для автоматизированного расчета на языке программирования «Python», основанная на вычислении предложенного критерия диагностирования (Приложение В).

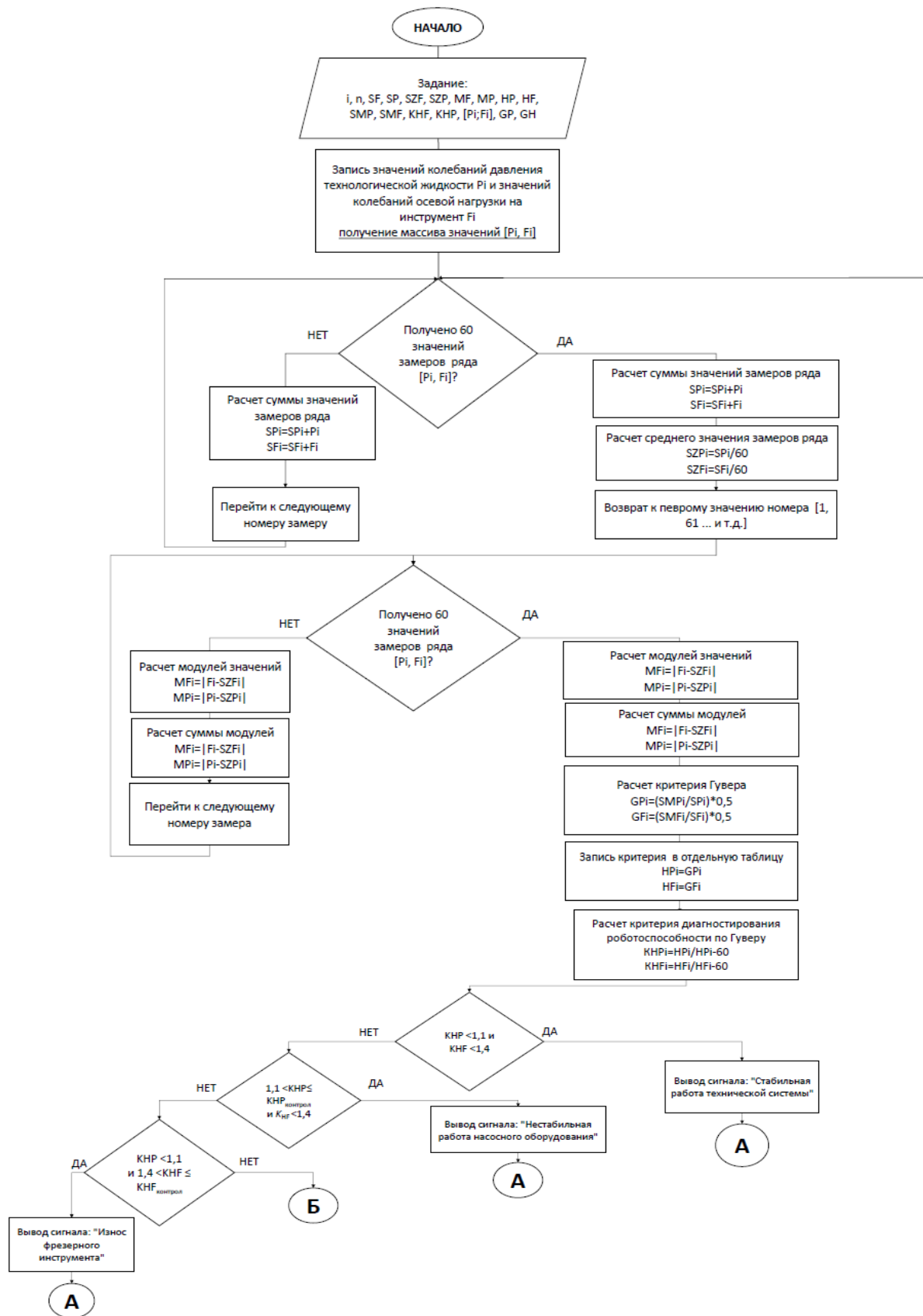
Программа может применяться при оценке технического состояния системы «ВЗД-ФИ» для определения основных отказов системы и при разработке автоматизированных систем управления процессом фрезерования [160, 161].

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- автоматизированный расчет критерия диагностирования;
- определение основных видов отказов оборудования при фрезеровании ОК: заклинивание ВЗД, подклинивание ВЗД, износ фрезерного инструмента, нестабильная работа насосного оборудования, нестабильная работа технической системы, отключение датчиков технической системы;
- возможность прогнозирования предаварийного состояния инструмента.

Данные, поступающие с персонального компьютера, входящего в состав испытательного стенда, импортируются в программу, далее производится расчет. Вывод результатов производится каждую минуту [99]. Для примера на Рисунке 3.24 представлен общий алгоритм определения критерия диагностирования для работы системы «ВЗД-ФИ».

Основные переменные в представленном алгоритме: i – номер замера (с); n – номер последнего замера (с); SP – сумма значений [колебаний давления]; SF – сумма значений [колебаний осевой нагрузки]; SZF – среднее значение ряда [колебаний осевой нагрузки]; SZP – среднее значение ряда [колебаний давления]; MF – модуль значения [колебаний осевой нагрузки]; MP – модуль значения [колебаний давления]; SMP – сумма модулей [колебаний давления]; SMF – сумма модулей [колебаний осевой нагрузки]; HP – критерий Гувера [колебаний давления]; HF – критерий Гувера [колебаний осевой нагрузки]; KHF – критерий диагностирования [колебаний осевой нагрузки]; KHP – критерий диагностирования [колебаний давления]; $[Pi; Fi]$ – массив полученных данных колебаний давления технологической жидкости и колебаний осевой нагрузки на инструмент; GP – дополнительная ячейка для записи значений критерия Гувера [колебаний давления]; GF – доп. ячейка для записи значений критерия Гувера [колебаний осевой нагрузки].



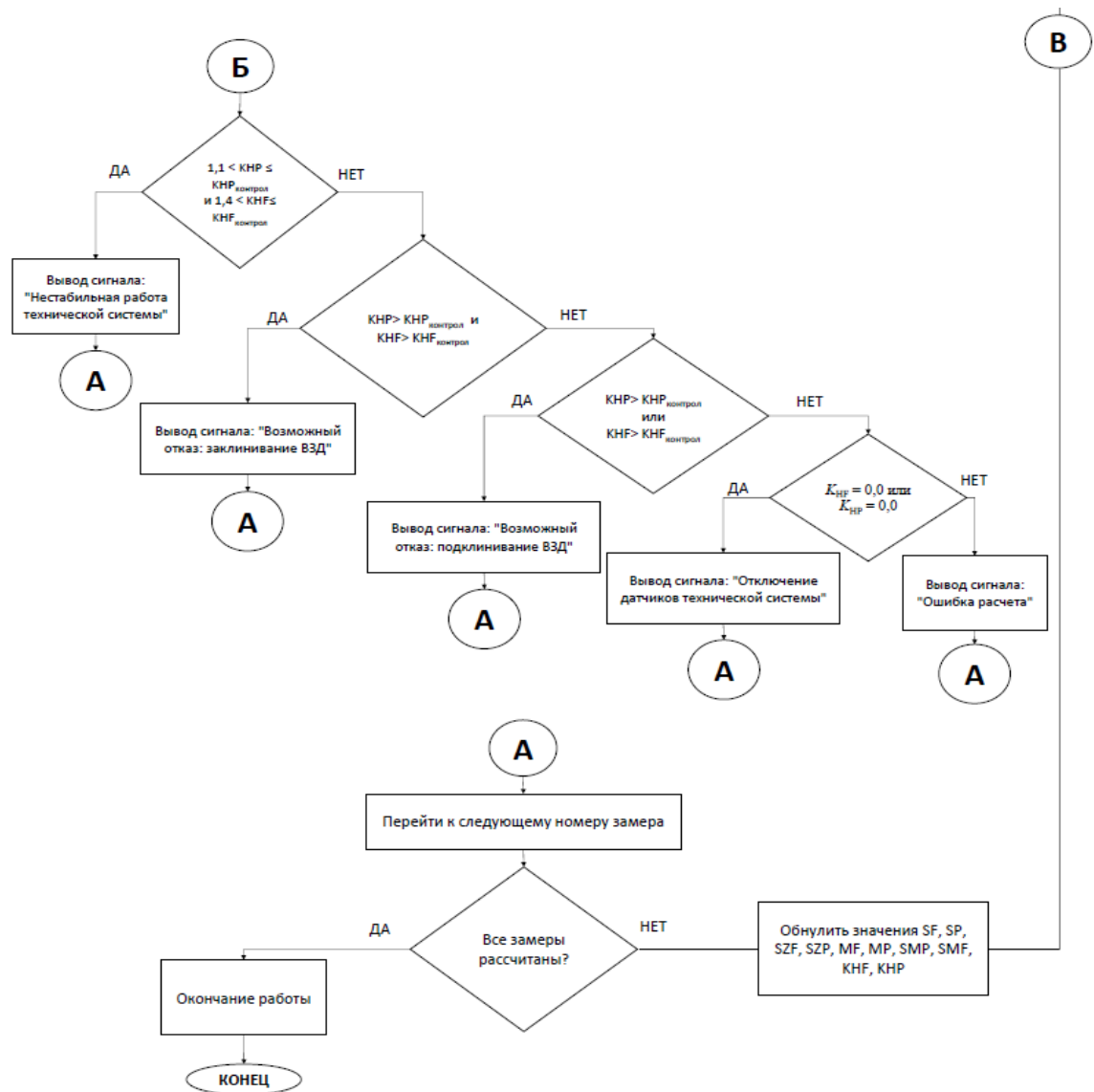


Рисунок 3.24 – Алгоритм определения критерия диагностирования

На Рисунке 3.25 показана общая схема работы автоматизированной программы. На блок обработки информации поступает запись колебаний давления технологической жидкости и осевой нагрузки в зависимости от типа ОК и фрезерного инструмента. Далее происходит расчет критериев диагностирования по алгоритму, представленному на Рисунке 3.24.

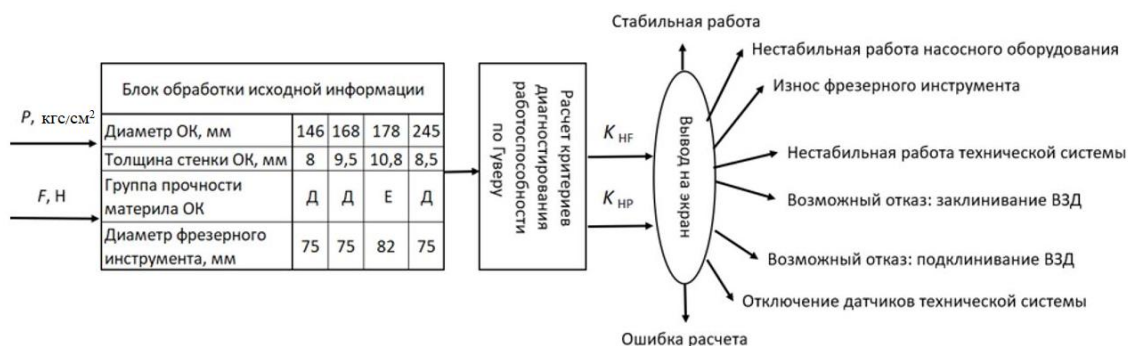


Рисунок 3.25 – Общая схема работы автоматизированной программы

Исходя из двух полученных значений каждую минуту испытания на экран выводится один из восьми возможных сигналов, описывающих определенную технологическую ситуацию.

В качестве примера на Рисунке 3.26 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 3.26, а):

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

При сигнале «Следующий (след.) 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 3.26, б):

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

155.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа насосного оборудования
0.905
4.329
156.0 минута --- След. интервал – Возможный отказ: Подклинивание ВЗД
УМЕНЬШИТЕ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ И ВЫХОДИТЕ НА РЕЖИМ
1.112
0.298
157.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа насосного оборудования
1.538
0.415
158.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа насосного оборудования
0.591
3.861
159.0 минута --- След. интервал – Возможный отказ: Подклинивание ВЗД
УМЕНЬШИТЕ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ И ВЫХОДИТЕ НА РЕЖИМ
1.236
0.35
160.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа насосного оборудования
0.938
6.485
161.0 минута --- След. интервал – Возможный отказ: Подклинивание ВЗД
УМЕНЬШИТЕ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ И ВЫХОДИТЕ НА РЕЖИМ
0.892
0.196
162.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
1.008
0.715
163.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
0.924
0.778

427.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
427.0 минута --- МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ
0.906
2.008
428.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа: Износ фрезерного инструмента
428.0 минута --- ЕСЛИ СКОРОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНО СНИЖАЕТСЯ, ОТКЛЮЧИТЕ НАСОС, ПОДНИМИТЕ ФРЕЗУ
0.99
1.462
429.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа: Износ фрезерного инструмента
429.0 минута --- ЕСЛИ СКОРОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНО СНИЖАЕТСЯ, ОТКЛЮЧИТЕ НАСОС, ПОДНИМИТЕ ФРЕЗУ
0.982
0.744
430.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
430.0 минута --- МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ
1.066
1.066
431.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
431.0 минута --- МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ
1.095
0.786
432.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
432.0 минута --- МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ
0.874
1.354
433.0 минута --- След. интервал – Стабильная работа технической системы
433.0 минута --- МОЖНО УВЕЛИЧИТЬ ОСЕВУЮ НАГРУЗКУ
1.124
0.61
434.0 минута --- Следующий интервал – Нестабильная работа насосного оборудования
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 3.26 – Фрагмент результатов работы программы

При сигнале «След. 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 технического состояния системы «ВЗД-ФИ».

В результате проведенных стендовых испытаний установлены следующие рекомендации:

1) по сигналу «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.

Полученные результаты по диагностированию и автоматизации оценки технического состояния системы «ВЗД-ФИ» использованы при проведении дальнейших стендовых испытаний оборудования в процессе фрезерования «окон» в обсадных колоннах.

3.4 Вероятностно-статистическая оценка состояния технической системы «ВЗД-ФИ»

Для оценки технического состояния системы «ВЗД-ФИ» при фрезеровании «окна» в обсадной колонне использован статистический метод распознавания, а именно метод Байеса, описанный в первой главе, который характеризуется простотой и эффективностью для статистического анализа [15, 62, 96, 108].

Для применения статистических методов использован стендовый эксперимент с фрезой диаметром 75 мм для ОК диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм и группой прочности Д, описанный на 77 стр. Данные интервала записи колебаний технологических параметров в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне приведены в Приложении Г. Ранее установлено, что во время испытания зарегистрированы следующие отказы технической системы:

- заклинивание ВЗД происходило в интервалах: 1080-1260, 4140-4440, 8820-9120, 14220-14820, 16020-16140, 17940-18180, 25320-25560 с;
- подклинивание ВЗД происходило в интервалах: 1980-2880, 5280-6180, 8881-9060 с;
- отключение датчиков происходило в интервалах: 2880-3540, 6180-6660 с.

Для примера определения диагностического веса критериев диагностирования технического состояния системы рассмотрен весь временной интервал фрезерования. Так как анализируются три признака, встречающихся при двух диагнозах, то сначала необходимо рассчитать данные критерии:

1 Критерий диагностирования работоспособности технической системы по энтропийному анализу. Энтропия $\mathcal{E}(D)$ системы «D», имеющей n возможных состояний с вероятностями их возникновения $G(D_1), G(D_2), \dots, G(D_n)$ определится с помощью двойных логарифмов [15, 26, 90] по формуле (3.5):

$$\mathcal{E}(D) = - \sum_{i=1}^n G(D_i) \log_2 G(D_i). \quad (3.5)$$

В качестве критериев диагностирования технической системы предлагаются следующие показатели (3.6) [26, 112, 115]:

$$K\mathcal{E}_P = \frac{\mathcal{E}_{\text{ТЕКР}}}{\mathcal{E}_{\text{ЭТР}}}, \quad K\mathcal{E}_F = \frac{\mathcal{E}_{\text{ТЕКФ}}}{\mathcal{E}_{\text{ЭТФ}}}, \quad (3.6)$$

где $K\mathcal{E}_P$ – критерий диагностирования работоспособности по энтропийному анализу по колебаниям давления технологической жидкости;

$K\mathcal{E}_F$ – критерий диагностирования работоспособности по энтропийному анализу по колебаниям осевой нагрузке;

$\mathcal{E}_{\text{ЭТР}}$ – энтропия колебаний давления технологической жидкости в начале фрезерования или ее эталонное значение;

$\mathcal{E}_{\text{ТЕКР}}$ – энтропия колебаний давления технологической жидкости для текущего состояния системы;

$\mathcal{E}_{\text{ЭТФ}}$ – энтропия колебаний осевой нагрузки в начале фрезерования или ее эталонное значение;

$\mathcal{E}_{\text{ТЕКФ}}$ – энтропия колебаний осевой нагрузки для текущего состояния системы.

Пример расчета эталонного значения энтропии по колебаниям давления технологической жидкости представлен в Таблице 3.7, в которой приняты следующие обозначения:

где N – время проведения испытания, с;

P – фрагмент записи колебаний давления технологической жидкости с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с, кгс/см²;

$P_{\text{упор}}$ – фрагмент записи колебаний давления технологической жидкости в возрастающем порядке, кгс/см²;

I_{Γ} – количество интервалов расчета, шт.;

$P_{\text{махупор}}$ – максимальное значение колебаний давления технологической жидкости в упордоченном ряду, кгс/см²;

$P_{\min_{пор}}$ – минимальное значение колебаний давления технологической жидкости в упорядоченном ряду, кгс/см²;

N_{vr} – размер интервала расчета;

N_i – количество чисел, попавших в новый интервал (количество образовавшихся интервалов может быть различно);

$LimP_{vr}$ – граница расчетного интервала, кгс/см²;

P_i – вероятность попадания значения в полученный интервал;

$\mathcal{E}_{талр}$ – эталонное значение энтропии по колебаниям давления технологической жидкости.

Далее на основании данных, полученных при испытании, рассчитаны текущие значения энтропии по колебаниям давления технологической жидкости и по осевой нагрузке на фрезерный инструмент. При обработке значений временного ряда вычисляются критерии диагностирования работоспособности по энтропийному анализу по колебаниям давления технологической жидкости и по колебаниям осевой нагрузки, согласно формуле (3.6).

Таблица 3.7 – Пример расчета значения энтропии по колебаниям давления технологической жидкости в начальный момент фрезерования ОК диаметром 146 мм и группой прочности Д

P	$N < 100$	$P_{упр}$	$dP = P_{max}^{упор} - P_{min}^{упор}$	$N_{вр} = dP / G_{вр}$	$N_{инт}$	$Lim P_{вр} = P_{min}^{упор} + N_{инт} * (dP / V_r)$	Интервал попадания значений	N_i	$P_i = N_i / N$	$Э_{талр}$
42,38	$V_r = 1 + 3,32 * \lg N$	36,36	7,89	1,1271	1	38,30	36,36-38,30	5	0,0833	2,58965
42,74	6,903462151	37,40			2	39,37	38,30-39,37	9	0,1500	
41,43	$V_r = 7$	37,99			3	40,44	39,37-40,44	7	0,1167	
36,36		38,30			4	41,51	40,44-41,51	17	0,2833	
39,58		38,43			5	42,58	41,51-42,58	13	0,2167	
41,13		38,44			6	43,65	42,58-43,65	7	0,1167	
40,62		39,08			7	44,72	43,65-44,72	2	0,0333	
39,59		39,11								
42,20		39,28								
43,17		39,32								
43,30		39,37								
37,40		39,37								
38,43		39,53								
41,54		39,58								
41,44		39,59								
41,56		39,87								
40,99		39,93								
42,63		39,94								
43,87		40,09								
43,41		40,31								
41,12		40,47								
37,99		40,49								
40,09		40,62								
40,77		40,77								
40,79		40,79								
44,25		40,99								
43,42		41,12								
44,13		41,13								
42,59		41,17								

Продолжение таблицы 3.7

39,37	41,30
41,87	41,41
39,53	41,43
41,41	41,44
39,32	41,45
42,10	41,54
42,76	41,56
43,51	41,63
42,02	41,87
41,30	42,02
39,37	42,10
40,49	42,18
39,28	42,20
39,08	42,29
41,17	42,33
42,33	42,38
42,42	42,42
42,18	42,59
38,30	42,63
39,94	42,74
40,31	42,75
39,11	42,76
40,47	43,17
42,75	43,30
42,29	43,41
44,06	43,42
41,45	43,51
38,44	43,87
39,93	44,06
41,63	44,13
39,87	44,25

2 Критерий диагностирования работоспособности технической системы по показателю Херста. Показатель Херста получают с помощью анализа методом нормированного размаха. Нормированный размах на заданном интервале определяют по формуле (3.7) [90-92]:

$$\frac{R(t)}{S(t)} = \frac{\max[\Delta(t)] - \min[\Delta(t)]}{S(t)} = \frac{\max[\Delta(t)] - \min[\Delta(t)]}{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^t (P_i - \bar{P})^2}, \quad (3.7)$$

где R – размах накопленных отклонений;

Δt – накопленное отклонение от среднего для некоторого интервала времени t , то есть разность между максимальным и минимальным отклонениями от среднего;

n – величина промежутка времени (количество точек в отрезке временного ряда);

$S(t)$ – стандартное отклонение;

P_i – значения колебаний давления технологической жидкости;

$\bar{P}$ – среднее выборочное по ряду.

Согласно формуле Херста (3.8-3.9) [24, 67, 84]:

$$\frac{R(t)}{S(t)} = (\alpha t)^{He}, \quad (3.8)$$

$$He = \frac{\log(\frac{R}{S}) - \log(\alpha)}{\log(m)}, \quad (3.9)$$

где He – показатель Херста;

m – число периодов наблюдений (количество точек в отрезке временного ряда);

α – константа (принимается равной 0,5).

Показатель He может изменяться в диапазоне от 0 до 1 и называется показателем Херста. В качестве критериев диагностирования работоспособности

технической системы по показателю Херста (KHe_i) предлагаются следующие показатели (3.10) [117]:

$$KHe_P = \frac{He_{P2}}{He_{P1}}, \quad KHe_F = \frac{He_{F2}}{He_{F1}}, \quad (3.10)$$

где He_{P1} и He_{F1} – показатели Херста соответственно колебаний давления технологической жидкости и колебаний осевой нагрузки в начале интервала фрезерования;

He_{P2} и He_{F2} – показатели Херста соответственно колебаний давления технологической жидкости и осевой нагрузки в процессе фрезерования.

Пример расчета показателя Херста по колебаниям давления технологической жидкости представлен в Таблице 3.8, в которой приняты следующие обозначения:

где N – время проведения испытания, с;

P_i – фрагмент записи колебаний давления технологической жидкости с интервалом дискретности $\Delta t = 1$ с, кгс/см²;

$P_{\text{упор}}$ – фрагмент записи колебаний давления технологической жидкости в возрастающем порядке, кгс/см²;

$P_{\text{ср}}$ – среднее выборочное по ряду;

R – размах накопленных отклонений, разница между наименьшим и наибольшим значением $P_{\text{упор}}$;

S – стандартное отклонение временного ряда.

Таблица 3.8 – Пример расчета значения показателя Херста по колебаниям давления технологической жидкости

P_i	$P_{\text{упор}}$	$P_{\text{ср}}$	$P_{\text{упор}} - P_{\text{ср}}$	R	S	R/S	$H_{\text{ер}}$
42,38	36,36	41,12	-4,67	7,89	1,7885	4,4115	0,5318
42,74	37,40		-3,96				
41,43	37,99		-3,94				
36,36	38,30		-3,82				
39,58	38,43		-3,72				
41,13	38,44		-3,70				
40,62	39,08		-3,66				
39,59	39,11		-3,35				
42,20	39,28		-2,85				
43,17	39,32		-2,66				
43,30	39,37		-2,63				
37,40	39,37		-2,61				
38,43	39,53		-2,60				
41,54	39,58		-2,29				
41,44	39,59		-2,26				
41,56	39,87		-1,91				
40,99	39,93		-1,65				
42,63	39,94		-1,59				
43,87	40,09		-1,50				
43,41	40,31		-1,31				
41,12	40,47		-1,26				
37,99	40,49		-1,10				
40,09	40,62		-1,08				
40,77	40,77		-0,99				
40,79	40,79		-0,55				
44,25	40,99		-0,39				
43,42	41,12		-0,33				
44,13	41,13		-0,12				
42,59	41,17		0,21				
39,37	41,30		0,21				
41,87	41,41		0,30				
39,53	41,43		0,32				
41,41	41,44		0,34				
39,32	41,45		0,40				
42,10	41,54		0,43				
42,76	41,56		0,46				
43,51	41,63		0,74				
42,02	41,87		0,74				
41,30	42,02		0,84				

Продолжение таблицы 3.8

P_i	$P_{\text{упор}}$	$P_{\text{ср}}$	$P_{\text{упор}} - P_{\text{ср}}$	R	S	R/S	He_P
39,37	42,10		0,95				
40,49	42,18		1,14				
39,28	42,20		1,27				
39,08	42,29		1,36				
41,17	42,33		1,46				
42,33	42,38		1,86				
42,42	42,42		1,99				
42,18	42,59		2,04				
38,30	42,63		2,17				
39,94	42,74		2,23				
40,31	42,75		2,47				
39,11	42,76		2,50				
40,47	43,17		2,61				
42,75	43,30		2,94				
42,29	43,41		2,95				
44,06	43,42		3,59				
41,45	43,51		3,85				
38,44	43,87		4,39				
39,93	44,06		4,98				
41,63	44,13		5,30				
39,87	44,25		5,43				

Далее на основании данных, полученных при испытании, рассчитаны остальные текущие значения показателя Херста по колебаниям давления технологической жидкости и по осевой нагрузке на фрезерный инструмент. При обработке значений временного ряда вычисляются критерии диагностирования работоспособности по показателю Херста по колебаниям давления технологической жидкости и по колебаниям осевой нагрузки, согласно формуле 3.10.

3 Критерий диагностирования работоспособности технической системы по Гуверу. Для данного испытания результаты расчета по колебаниям давления технологической жидкости и по колебаниям осевой нагрузки данного критерия приведены в Таблице 3.5 [120].

Необходимо свести все полученные результаты расчета в Таблицу 3.9 для упрощения анализа и дальнейшего расчета.

Таблица 3.9 – Результаты вычисления различных критериев диагностирования при анализе колебаний осевой нагрузки и колебаний рабочей жидкости при фрезеровании колонны

Интервал фрезерования, с	$KЭ_F$	$KЭ_P$	KHe_F	KHe_P	KHF	KHP	Сигнал, соответствующий технологической ситуации
1	2	3	4	5	6	7	8
1-60	-	-	1,26	1,23	0,05	0,05	Стабильная работа
61-120	1,51	2,07	0,96	0,93	10,38	0,93	Стабильная работа
121-180	0,78	1,95	1,11	1,05	0,42	1,07	Стабильная работа
181-240	1,41	2,19	0,93	1,04	0,95	1,12	Стабильная работа
241-300	1,57	2,19	1,00	0,90	4,16	0,89	Стабильная работа
301-360	1,35	1,86	1,17	1,19	0,90	1,27	Стабильная работа
361-420	1,14	1,98	0,78	0,99	0,65	3,17	Стабильная работа
421-480	1,54	0,58	1,22	0,83	1,01	1,19	Стабильная работа
481-540	1,48	1,71	0,98	1,12	0,65	0,13	Стабильная работа
541-600	1,44	2,17	1,00	1,06	1,82	1,27	Стабильная работа
601-660	1,44	2,04	1,15	1,05	0,82	0,94	Стабильная работа
661-720	1,18	2,00	0,84	0,95	1,03	1,10	Стабильная работа
721-780	1,55	2,07	1,21	0,97	0,83	1,02	Стабильная работа
781-840	1,15	2,12	0,90	1,07	1,05	0,90	Стабильная работа
841-900	1,35	2,04	1,03	1,09	0,68	0,91	Стабильная работа
901-960	1,37	1,84	0,86	0,88	0,86	0,89	Стабильная работа
961-1020	1,56	2,08	1,26	1,03	1,20	1,15	Стабильная работа
1021-1080	1,23	2,01	0,91	1,08	1,12	1,26	Нестабильная работа
1081-1140	1,37	1,90	0,99	0,91	0,75	0,81	Стабильная работа
1141-1200	1,44	2,11	0,90	1,12	1,21	0,84	Нестабильная работа
1201-1260	1,47	1,81	1,08	0,92	0,76	1,07	Стабильная работа
1261-1320	1,48	2,09	1,01	1,03	0,98	1,11	Стабильная работа
1321-1380	1,45	1,96	1,00	1,00	0,88	0,91	Стабильная работа
1381-1440	1,49	1,96	1,08	1,02	0,96	1,11	Стабильная работа
1441-1500	1,35	1,88	0,92	0,93	0,92	0,89	Стабильная работа
1501-1560	1,36	2,11	1,02	0,97	1,11	1,01	Стабильная работа
1561-1620	1,43	2,13	0,97	1,05	0,98	0,90	Стабильная работа
1621-1680	1,50	2,05	1,12	1,14	1,12	5,10	Нестабильная работа
1681-1740	1,19	0,17	1,11	0,67	5,91	2,96	Нестабильная работа
1741-1800	0,14	1,85	0,82	1,22	0,38	0,08	Стабильная работа
1801-1860	1,44	2,17	1,12	1,05	0,85	1,18	Стабильная работа
1861-1920	1,08	2,09	0,90	1,14	0,83	0,73	Стабильная работа
1921-1980	1,41	1,69	0,99	0,91	1,08	1,17	Стабильная работа
1981-2040	1,47	1,98	0,99	1,00	0,69	0,87	Стабильная работа
2041-2100	1,49	1,94	1,06	0,90	0,77	1,02	Стабильная работа
2101-2160	1,41	2,10	0,97	1,16	0,68	0,84	Стабильная работа
2161-2220	1,42	1,93	1,12	0,90	1,08	1,49	Нестабильная работа
2221-2280	1,21	2,01	0,90	0,98	0,95	0,58	Стабильная работа

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
2281-2340	1,41	2,04	0,97	0,98	1,05	1,76	Стабильная работа
2341-2400	1,48	2,14	1,05	1,03	1,18	0,88	Стабильная работа
2401-2460	1,40	1,95	1,10	1,08	0,97	0,99	Стабильная работа
2461-2520	1,22	1,64	0,93	0,94	0,95	0,62	Стабильная работа
2521-2580	1,26	2,09	1,00	1,07	1,16	1,24	Стабильная работа
2581-2640	1,35	1,99	1,02	0,99	0,90	0,85	Стабильная работа
2641-2700	1,30	2,03	0,94	1,25	1,46	2,88	Нестабильная работа
2701-2760	1,44	0,10	0,93	0,86	0,90	0,56	Стабильная работа
2761-2820	1,50	1,83	1,04	0,91	1,33	0,88	Стабильная работа
2821-2880	1,48	2,07	1,17	0,95	0,67	1,10	Стабильная работа
2881-2940	1,15	2,15	0,87	1,11	1,10	0,93	Стабильная работа
2941-3000	1,40	1,96	1,03	0,91	0,91	1,02	Стабильная работа
3001-3060	1,39	2,12	0,98	1,02	1,41	1,45	Стабильная работа
3061-3120	1,40	2,03	1,01	1,06	0,66	0,62	Стабильная работа
3121-3180	1,36	2,00	0,91	0,91	1,10	1,28	Стабильная работа
3181-3240	1,57	2,06	1,13	0,98	1,01	1,03	Стабильная работа
3241-3300	1,41	2,15	1,07	1,16	0,85	0,90	Стабильная работа
3301-3360	1,24	1,93	0,90	0,93	0,89	0,68	Стабильная работа
3361-3420	1,38	2,04	0,98	1,08	1,61	1,91	Стабильная работа
3421-3480	1,46	1,88	1,04	0,97	0,79	0,74	Стабильная работа
3481-3540	1,40	1,86	1,04	0,99	1,12	1,13	Стабильная работа
3541-3600	1,32	2,01	0,97	0,96	0,92	0,90	Стабильная работа
3601-3660	1,37	2,06	0,90	1,02	1,57	0,93	Стабильная работа
3661-3720	1,31	2,05	-	1,00	0,00	0,98	Стабильная работа
3721-3780	-	2,05	-	0,98	0,00	0,76	Стабильная работа
3781-3840	-	2,07	-	0,99	0,00	1,21	Нестабильная работа
3841-3900	-	1,90	-	1,17	0,00	1,81	Нестабильная работа
3901-3960	-	1,50	-	0,76	0,00	7,30	Нестабильная работа
3961-4020	1,36	2,04	1,00	1,17	0,84	0,12	Стабильная работа
4021-4080	1,35	2,02	1,28	0,97	0,31	0,61	Стабильная работа
4081-4140	1,36	2,07	0,98	0,97	1,13	1,91	Нестабильная работа
4141-4200	1,42	2,09	0,95	1,12	1,12	0,77	Стабильная работа
4201-4260	1,51	1,80	0,83	0,99	1,74	10,26	Нестабильная работа
4261-4320	1,31	1,38	1,10	0,85	0,87	0,47	Стабильная работа
4321-4380	1,57	1,84	0,97	1,08	1,04	0,14	Стабильная работа
4381-4440	1,55	2,01	1,16	1,13	0,60	1,15	Нестабильная работа
4441-4500	1,36	1,82	1,02	0,95	0,92	1,09	Стабильная работа
4501-4560	1,38	1,81	1,00	0,96	1,20	1,05	Стабильная работа
4561-4620	1,33	1,97	0,92	1,02	1,83	1,32	Нестабильная работа
4621-4680	1,39	1,90	1,06	0,90	0,45	0,72	Стабильная работа
4681-4740	1,45	2,15	1,01	1,02	1,07	0,90	Стабильная работа
4741-4800	1,40	2,12	1,12	0,99	0,76	1,23	Стабильная работа
4801-4860	1,12	2,11	0,84	1,00	1,06	0,94	Стабильная работа
4861-4920	1,47	2,07	1,05	1,02	0,86	0,71	Стабильная работа
4921-4980	1,44	2,10	0,96	1,04	1,31	0,83	Стабильная работа

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
4981-5040	1,52	2,05	1,11	1,02	0,86	1,15	Стабильная работа
5041-5100	1,34	2,06	0,93	1,03	1,32	1,05	Стабильная работа
5101-5160	1,45	1,86	0,94	0,99	0,98	0,82	Стабильная работа
5161-5220	1,52	1,95	1,03	1,00	0,97	0,88	Стабильная работа
5221-5280	1,51	2,00	1,07	1,00	0,98	1,18	Нестабильная работа
5281-5340	1,39	2,03	1,04	0,98	1,13	1,27	Нестабильная работа
5341-5400	1,35	1,91	0,99	0,95	0,84	1,12	Нестабильная работа
5401-5460	1,37	2,13	1,00	1,04	0,94	1,19	Нестабильная работа
5461-5520	1,38	2,06	0,90	1,00	0,85	0,82	Стабильная работа
5521-5580	1,43	2,01	1,03	0,93	0,99	1,16	Нестабильная работа
5581-5640	1,47	2,17	1,06	1,06	0,99	1,15	Нестабильная работа
5641-5700	1,35	2,06	0,88	1,12	0,92	0,60	Стабильная работа
5701-5760	1,54	1,84	1,09	0,89	1,05	1,09	Стабильная работа
5761-5820	1,44	2,08	0,95	0,95	0,99	1,31	Нестабильная работа
5821-5880	1,56	2,08	0,98	1,10	0,93	0,89	Стабильная работа
5881-5940	1,56	1,98	1,04	1,03	1,11	0,74	Стабильная работа
5941-6000	1,50	1,92	1,04	0,91	0,85	1,45	Нестабильная работа
6001-6060	1,42	2,07	0,96	1,01	1,56	1,26	Нестабильная работа
6061-6120	1,49	2,09	1,05	1,01	0,82	0,93	Стабильная работа
6121-6180	1,40	2,05	0,88	1,00	1,12	0,88	Стабильная работа
6181-6240	1,52	2,04	1,09	0,98	0,95	0,66	Стабильная работа
6241-6300	1,40	2,04	0,81	0,80	2,20	14,78	Нестабильная работа
6301-6360	1,47	0,54	1,13	-	3,49	0,00	Нестабильная работа
6361-6420	0,43	-	1,11	-	0,10	0,00	Стабильная работа
6421-6480	1,42	1,85	1,03	1,16	1,47	0,08	Стабильная работа
6481-6540	1,41	1,89	0,92	0,93	0,75	1,24	Стабильная работа
6541-6600	1,49	2,01	1,04	0,97	0,88	0,86	Стабильная работа
6601-6660	1,45	2,03	1,01	0,94	0,98	1,14	Стабильная работа
6661-6720	1,46	2,19	1,02	1,06	1,41	1,27	Стабильная работа
6721-6780	1,44	2,10	1,02	1,11	0,81	0,74	Стабильная работа
6781-6840	1,37	1,81	0,92	0,89	1,21	1,34	Стабильная работа
6841-6900	1,55	2,15	1,05	1,04	0,87	0,83	Стабильная работа
6901-6960	1,45	2,07	0,94	0,96	1,24	1,02	Стабильная работа
6961-7020	1,51	2,12	1,05	1,04	0,69	1,17	Стабильная работа
7021-7080	1,46	2,07	0,98	0,96	1,08	0,82	Стабильная работа
7081-7140	1,53	2,08	0,97	1,08	1,02	0,96	Стабильная работа
7141-7200	1,55	1,98	1,08	1,03	0,99	1,02	Стабильная работа
7201-7260	1,46	1,88	0,89	0,89	0,97	1,00	Стабильная работа
7261-7320	1,53	2,09	1,06	1,02	1,01	1,05	Стабильная работа
7321-7380	1,52	2,09	1,00	0,99	0,82	0,92	Стабильная работа
7381-7440	1,50	2,10	1,06	1,04	1,18	1,11	Стабильная работа
7441-7500	1,44	2,04	0,96	0,98	0,86	0,89	Стабильная работа
7501-7560	1,50	2,03	1,09	1,00	1,15	1,04	Стабильная работа
7561-7620	1,40	2,09	0,97	1,03	1,28	1,15	Стабильная работа
7621-7680	1,39	2,06	0,95	1,00	0,78	0,82	Стабильная работа

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
7681-7740	1,52	1,89	1,02	1,00	1,06	1,06	Стабильная работа
7741-7800	1,42	2,05	0,92	0,93	1,05	1,08	Стабильная работа
7801-7860	1,59	2,16	1,07	1,04	0,87	0,98	Стабильная работа
7861-7920	1,51	2,09	0,99	1,04	0,97	0,89	Стабильная работа
7921-7980	1,51	1,98	0,97	0,93	1,07	1,02	Стабильная работа
7981-8040	1,55	2,12	1,03	1,15	1,09	1,04	Стабильная работа
8041-8100	1,51	1,82	1,01	0,95	0,89	0,99	Стабильная работа
8101-8160	1,52	1,97	0,95	1,00	1,22	1,03	Стабильная работа
8161-8220	1,58	1,94	1,05	1,02	0,86	0,90	Стабильная работа
8221-8280	1,52	1,89	0,98	0,94	0,76	1,07	Стабильная работа
8281-8340	1,52	2,06	1,01	1,02	1,23	1,03	Стабильная работа
8341-8400	1,51	2,03	1,01	0,97	1,06	0,94	Стабильная работа
8401-8460	1,55	2,06	0,99	1,01	1,30	1,22	Стабильная работа
8461-8520	1,52	2,04	1,06	1,02	0,71	0,84	Стабильная работа
8521-8580	1,46	1,94	0,96	1,00	1,09	1,16	Стабильная работа
8581-8640	1,50	2,00	0,97	1,01	1,14	0,98	Стабильная работа
8641-8700	1,56	2,02	1,02	1,01	0,79	0,84	Стабильная работа
8701-8760	1,51	1,95	0,94	0,92	1,23	1,27	Нестабильная работа
8761-8820	1,52	2,11	0,85	1,13	5,82	18,16	Нестабильная работа
8821-8880	0,91	0,91	1,13	0,90	0,78	0,18	Стабильная работа
8881-8940	1,01	1,60	1,10	0,97	0,35	0,31	Стабильная работа
8941-9000	1,47	2,11	0,96	1,08	1,66	1,07	Нестабильная работа
9001-9060	1,47	2,04	1,02	0,98	0,41	0,88	Стабильная работа
9061-9120	1,46	2,05	1,00	0,98	1,06	1,01	Стабильная работа
9121-9180	1,51	2,10	1,03	1,02	0,71	1,00	Стабильная работа
9181-9240	1,50	2,01	1,00	0,95	1,26	1,04	Стабильная работа
9241-9300	1,50	2,15	1,03	1,11	1,30	1,02	Стабильная работа
9301-9360	1,37	1,86	0,96	0,97	0,58	0,91	Стабильная работа
9361-9420	1,53	2,10	0,93	1,02	1,16	0,81	Стабильная работа
9421-9480	1,59	1,99	1,14	0,91	0,86	1,36	Стабильная работа
9481-9540	1,42	2,16	0,90	1,12	1,23	0,98	Стабильная работа
9541-9600	1,59	1,98	0,99	1,02	1,01	0,80	Стабильная работа
9601-9660	1,56	1,93	1,00	1,00	1,01	1,02	Стабильная работа
9661-9720	1,55	1,93	1,07	0,92	1,04	1,32	Стабильная работа
9721-9780	1,50	2,13	0,98	0,98	0,79	0,86	Стабильная работа
9781-9840	1,50	2,12	1,06	1,04	0,97	0,96	Стабильная работа
9841-9900	1,48	2,05	0,90	1,03	1,05	0,92	Стабильная работа
9901-9960	1,55	1,96	1,06	0,99	1,21	1,10	Стабильная работа
9961-10020	1,52	2,02	0,99	0,99	0,82	0,94	Стабильная работа
10021-10080	1,53	2,00	0,98	1,06	1,16	1,08	Стабильная работа
10081-10140	1,54	1,88	1,12	0,99	0,86	1,03	Стабильная работа
10141-10200	1,37	1,94	0,97	0,99	0,83	0,91	Стабильная работа
10201-10260	1,48	2,01	0,95	1,02	1,20	1,08	Стабильная работа
10261-10320	1,51	1,88	0,97	0,93	0,93	1,05	Стабильная работа
10321-10380	1,60	2,04	1,04	1,06	1,25	0,99	Стабильная работа

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
10381-10440	1,51	1,95	0,94	0,98	0,81	0,81	Стабильная работа
10441-10500	1,60	2,05	1,05	1,01	0,95	1,15	Стабильная работа
10501-10560	1,56	1,97	1,05	1,03	1,30	0,92	Стабильная работа
10561-10620	1,47	1,92	0,93	0,96	0,92	1,04	Стабильная работа
10621-10680	1,56	2,03	1,00	0,95	0,97	1,23	Стабильная работа
10681-10740	1,57	2,05	1,03	1,00	1,08	0,83	Стабильная работа
10741-10800	1,50	2,10	1,14	1,04	0,94	0,98	Стабильная работа
10801-10860	1,32	2,05	0,93	0,97	0,94	1,06	Стабильная работа
10861-10920	1,44	2,06	0,97	0,99	0,96	0,92	Стабильная работа
10921-10980	1,51	2,08	0,98	1,02	0,97	0,95	Стабильная работа
10981-11040	1,52	1,98	0,95	1,01	1,16	0,95	Стабильная работа
11041-11100	1,58	2,03	0,99	0,97	0,92	0,95	Стабильная работа
11101-11160	1,57	2,05	1,03	1,02	1,19	1,11	Стабильная работа
11161-11220	1,56	2,04	1,00	1,04	1,02	1,07	Стабильная работа
11221-11280	1,53	2,00	0,95	0,93	0,72	0,85	Стабильная работа
11281-11340	1,60	2,05	1,06	1,07	1,38	1,16	Стабильная работа
11341-11400	1,53	2,03	1,05	0,94	0,67	0,98	Стабильная работа
11401-11460	1,45	2,09	1,03	1,08	1,29	0,98	Стабильная работа
11461-11520	1,43	1,98	0,98	1,02	1,34	1,65	Стабильная работа
11521-11580	1,38	1,89	0,99	0,95	0,56	0,85	Стабильная работа
11581-11640	1,50	1,79	1,00	1,03	1,13	0,82	Стабильная работа
11641-11700	1,44	1,99	1,03	0,95	1,41	1,19	Стабильная работа
11701-11760	1,45	1,99	0,97	1,04	0,74	0,75	Стабильная работа
11761-11820	1,50	1,94	1,04	0,96	1,04	1,08	Стабильная работа
11821-11880	1,47	2,05	0,99	1,03	0,96	0,96	Стабильная работа
11881-11940	1,22	1,98	1,15	0,97	0,64	1,41	Стабильная работа
11941-12000	0,94	1,94	0,82	1,06	2,31	0,68	Стабильная работа
12001-12060	1,55	1,93	0,93	0,97	0,75	0,94	Стабильная работа
12061-12120	1,49	2,00	0,99	0,96	1,06	1,15	Стабильная работа
12121-12180	1,57	2,07	1,15	1,04	0,99	1,01	Стабильная работа
12181-12240	1,44	2,00	1,03	1,02	0,81	0,93	Стабильная работа
12241-12300	1,32	1,98	0,91	0,95	1,15	0,98	Стабильная работа
12301-12360	1,54	2,10	1,01	0,99	1,06	1,08	Стабильная работа
12361-12420	1,48	2,05	0,96	1,02	1,09	0,88	Стабильная работа
12421-12480	1,49	2,10	1,00	1,04	1,34	1,18	Стабильная работа
12481-12540	1,54	1,93	1,16	0,93	0,16	1,03	Стабильная работа
12541-12600	1,33	2,14	0,86	1,05	3,81	0,82	Нестабильная работа
12601-12660	1,48	2,03	1,12	0,95	1,24	1,18	Нестабильная работа
12661-12720	1,37	2,12	0,97	1,07	0,74	0,99	Стабильная работа
12721-12780	1,44	2,06	0,88	1,06	1,37	0,88	Стабильная работа
12781-12840	1,56	1,92	1,12	0,91	1,24	1,65	Нестабильная работа
12841-12900	1,49	2,05	1,04	1,02	0,55	0,58	Стабильная работа
12901-12960	1,35	2,01	0,94	1,04	1,17	1,03	Стабильная работа
12961-13020	1,52	1,98	0,93	0,94	1,20	1,14	Стабильная работа
13021-13080	1,61	2,08	0,98	0,99	1,15	1,00	Стабильная работа

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
13081-13140	1,57	2,09	1,15	1,09	1,07	1,13	Стабильная работа
13141-13200	1,49	1,84	1,06	0,95	0,76	1,22	Стабильная работа
13201-13260	1,31	1,98	0,89	0,95	0,60	0,66	Стабильная работа
13261-13320	1,55	2,11	1,20	1,04	1,17	1,14	Стабильная работа
13321-13380	1,10	2,00	0,91	1,13	0,87	1,47	Стабильная работа
13381-13440	1,35	1,22	0,98	0,94	1,50	0,78	Стабильная работа
13441-13500	1,34	1,90	1,02	1,00	0,93	0,91	Стабильная работа
13501-13560	1,32	1,82	1,15	0,95	0,60	1,05	Стабильная работа
13561-13620	1,03	2,02	0,79	1,01	1,95	1,08	Стабильная работа
13621-13680	1,52	2,06	0,99	1,01	0,98	0,93	Стабильная работа
13681-13740	1,60	1,97	1,09	0,93	0,84	0,89	Стабильная работа
13741-13800	1,46	2,09	0,97	1,06	1,39	1,12	Стабильная работа
13801-13860	1,43	1,96	1,02	1,06	0,70	0,89	Стабильная работа
13861-13920	1,39	1,92	1,00	0,95	1,14	1,69	Стабильная работа
13921-13980	1,42	1,80	0,98	1,09	0,88	0,63	Стабильная работа
13981-14040	1,45	1,75	0,95	0,98	1,40	1,15	Стабильная работа
14041-14100	1,50	1,84	1,19	0,97	0,54	0,75	Стабильная работа
14101-14160	1,13	1,84	0,88	0,95	1,12	0,84	Стабильная работа
14161-14220	1,49	2,05	1,05	0,91	0,91	1,36	Нестабильная работа
14221-14280	1,38	2,16	1,01	1,10	1,51	1,04	Нестабильная работа
14281-14340	1,42	1,96	0,99	1,06	0,90	0,90	Стабильная работа
14341-14400	1,43	1,89	1,08	0,88	0,86	1,00	Стабильная работа
14401-14460	1,11	2,12	0,64	1,16	7,93	14,49	Нестабильная работа
14461-14520	0,86	0,52	1,19	0,87	0,67	0,08	Стабильная работа
14521-14580	1,54	2,01	1,17	0,98	0,64	0,91	Стабильная работа
14581-14640	1,09	2,14	1,06	1,14	0,74	0,88	Стабильная работа
14641-14700	1,19	1,85	0,82	0,92	0,50	1,05	Стабильная работа
14701-14760	1,60	1,97	1,15	0,98	1,30	1,00	Стабильная работа
14761-14820	1,46	2,11	1,00	1,06	0,78	0,91	Стабильная работа
14821-14880	1,48	1,95	0,97	0,99	1,54	1,15	Нестабильная работа
14881-14940	1,45	1,91	1,05	0,96	0,46	1,04	Стабильная работа
14941-15000	1,44	2,11	1,10	0,96	1,21	0,94	Стабильная работа
15001-15060	1,25	2,15	0,94	1,12	1,04	0,96	Стабильная работа
15061-15120	1,41	1,92	0,96	0,89	1,05	1,13	Стабильная работа
15121-15180	1,45	2,13	1,04	1,09	1,06	1,06	Стабильная работа
15181-15240	1,34	1,95	0,97	0,93	1,10	0,91	Стабильная работа
15241-15300	1,48	2,06	1,01	1,00	0,74	0,95	Стабильная работа
15301-15360	1,45	2,13	1,04	0,97	1,14	1,07	Стабильная работа
15361-15420	1,36	2,17	0,95	0,99	1,07	0,84	Стабильная работа
15421-15480	1,46	2,14	0,96	1,03	1,07	1,01	Стабильная работа
15481-15540	1,52	2,12	1,06	1,09	0,97	0,80	Стабильная работа
15541-15600	1,36	2,04	0,98	1,01	0,52	1,23	Стабильная работа
15601-15660	1,32	1,96	1,01	0,96	1,24	0,96	Стабильная работа
15661-15720	1,49	1,96	0,99	0,99	1,22	0,99	Стабильная работа
15721-15780	1,46	2,09	1,03	0,96	1,01	1,12	Стабильная работа

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
15781-15840	1,42	2,11	0,91	1,05	1,24	0,98	Стабильная работа
15841-15900	1,53	2,02	1,10	0,98	0,95	0,88	Стабильная работа
15901-15960	1,42	2,10	0,92	1,30	0,62	1,64	Нестабильная работа
15961-16020	1,16	0,10	0,23	0,89	2,02	11,82	Нестабильная работа
16021-16080	0,79	0,95	4,31	0,80	1,64	0,06	Нестабильная работа
16081-16140	1,53	2,15	1,06	1,21	0,75	1,08	Стабильная работа
16141-16200	1,47	1,63	0,98	0,84	1,35	1,02	Стабильная работа
16201-16260	1,50	2,17	1,00	1,11	0,49	0,95	Стабильная работа
16261-16320	1,36	1,99	0,89	0,95	0,95	0,80	Стабильная работа
16321-16380	1,56	2,09	0,97	0,84	1,32	1,70	Стабильная работа
16381-16440	1,49	1,98	1,08	1,20	0,88	0,68	Стабильная работа
16441-16500	1,57	1,83	1,06	0,99	1,02	1,20	Стабильная работа
16501-16560	1,48	2,08	0,97	1,02	0,85	0,91	Стабильная работа
16561-16620	1,43	1,98	1,05	0,94	1,45	0,97	Стабильная работа
16621-16680	1,49	2,16	1,04	1,06	0,56	1,04	Стабильная работа
16681-16740	1,43	2,07	1,00	1,02	1,17	0,82	Стабильная работа
16741-16800	1,43	2,01	1,04	1,00	0,99	1,22	Стабильная работа
16801-16860	1,31	2,07	0,95	1,00	0,83	0,94	Стабильная работа
16861-16920	1,47	2,04	1,04	1,01	1,06	0,98	Стабильная работа
16921-16980	1,31	2,04	0,91	0,96	2,21	1,26	Нестабильная работа
16981-17040	1,41	2,11	1,07	1,03	0,34	0,82	Стабильная работа
17041-17100	1,34	2,02	0,87	0,93	1,52	1,16	Нестабильная работа
17101-17160	1,58	2,15	1,09	1,04	1,17	0,87	Нестабильная работа
17161-17220	1,52	2,05	1,04	1,04	0,88	0,89	Стабильная работа
17221-17280	1,31	1,97	1,00	0,94	0,80	1,32	Нестабильная работа
17281-17340	1,40	2,12	0,92	0,98	1,12	0,81	Стабильная работа
17341-17400	1,56	2,03	1,04	0,98	1,21	1,33	Нестабильная работа
17401-17460	1,49	2,08	1,02	1,07	1,24	0,82	Стабильная работа
17461-17520	1,40	2,09	1,08	1,01	0,60	1,01	Стабильная работа
17521-17580	1,38	1,92	0,88	0,93	1,35	0,98	Стабильная работа
17581-17640	1,16	1,95	1,13	1,20	0,58	1,02	Стабильная работа
17641-17700	1,25	1,75	1,02	0,75	1,21	0,96	Стабильная работа
17701-17760	1,07	1,64	0,90	1,10	0,99	1,19	Стабильная работа
17761-17820	1,14	1,80	1,08	1,13	1,34	0,81	Стабильная работа
17821-17880	1,21	1,83	0,65	1,18	7,29	15,66	Нестабильная работа
17881-17940	0,80	1,08	1,12	0,88	0,74	0,09	Стабильная работа
17941-18000	1,31	1,91	1,05	0,80	0,82	0,85	Стабильная работа
18001-18060	1,54	2,13	1,33	1,16	0,13	0,88	Стабильная работа
18061-18120	0,91	2,13	0,72	1,19	10,20	13,55	Нестабильная работа
18121-18180	1,17	0,93	1,04	0,79	0,70	0,09	Стабильная работа
18181-18240	1,28	2,10	1,18	1,01	0,46	0,87	Стабильная работа
18241-18300	1,50	2,15	1,22	0,99	1,39	1,09	Стабильная работа
18301-18360	1,02	2,18	0,81	1,02	0,48	0,85	Стабильная работа
18361-18420	1,52	2,17	1,12	1,06	0,95	1,18	Стабильная работа
18421-18480	1,34	2,00	0,91	0,95	1,02	0,90	Стабильная работа

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
18481-18540	1,50	2,12	1,06	0,97	1,10	1,02	Стабильная работа
18541-18600	1,36	2,14	1,02	1,01	0,64	1,01	Стабильная работа
18601-18660	1,42	2,15	0,86	1,05	1,43	0,97	Стабильная работа
18661-18720	1,53	2,11	1,08	0,96	0,86	1,01	Стабильная работа
18721-18780	1,51	2,16	1,01	0,99	1,59	1,08	Стабильная работа
18781-18840	1,51	2,13	1,06	1,05	0,47	0,92	Стабильная работа
18841-18900	1,37	2,11	0,94	0,98	1,29	1,03	Стабильная работа
18901-18960	1,42	2,11	0,97	0,97	0,88	0,99	Стабильная работа
18961-19020	1,54	2,12	1,09	1,04	1,13	0,98	Стабильная работа
19021-19080	1,46	2,05	0,95	1,01	1,05	1,06	Стабильная работа
19081-19140	1,40	2,08	1,01	0,98	0,89	0,98	Стабильная работа
19141-19200	1,49	2,09	1,05	0,98	1,02	0,95	Стабильная работа
19201-19260	1,35	2,13	0,92	1,04	0,89	1,02	Стабильная работа
19261-19320	1,52	2,07	0,92	0,92	1,02	1,00	Стабильная работа
19321-19380	1,56	2,17	1,01	1,02	1,28	1,09	Стабильная работа
19381-19440	1,54	2,18	1,06	1,10	0,93	0,86	Стабильная работа
19441-19500	1,54	1,95	1,04	0,90	0,91	1,06	Стабильная работа
19501-19560	1,43	2,15	0,93	1,03	1,23	0,93	Стабильная работа
19561-19620	1,47	2,12	1,09	1,03	0,85	1,14	Стабильная работа
19621-19680	1,44	2,14	0,98	0,95	0,81	1,00	Стабильная работа
19681-19740	1,51	2,16	0,98	1,05	1,13	0,91	Стабильная работа
19741-19800	1,43	2,11	1,05	0,99	1,02	1,14	Стабильная работа
19801-19860	1,49	2,10	0,96	1,01	1,59	1,00	Стабильная работа
19861-19920	1,47	2,12	1,11	0,99	0,42	0,88	Стабильная работа
19921-19980	1,26	2,14	0,99	1,00	1,43	1,02	Стабильная работа
19981-20040	1,39	2,11	0,97	1,02	1,00	0,97	Стабильная работа
20041-20100	1,46	2,08	0,96	0,99	1,40	1,05	Стабильная работа
20101-20160	1,42	2,09	0,95	0,98	0,70	1,03	Стабильная работа
20161-20220	1,39	2,16	1,07	0,99	1,02	0,92	Стабильная работа
20221-20280	1,42	2,17	0,97	1,00	0,98	1,05	Стабильная работа
20281-20340	1,51	2,16	1,01	1,15	1,26	0,94	Стабильная работа
20341-20400	1,37	1,93	1,02	0,92	0,65	1,00	Стабильная работа
20401-20460	1,44	2,07	0,95	1,05	1,19	0,98	Стабильная работа
20461-20520	1,56	2,02	1,02	0,90	1,11	1,13	Стабильная работа
20521-20580	1,49	2,15	1,02	1,05	1,05	1,03	Стабильная работа
20581-20640	1,45	2,10	0,96	0,96	0,89	0,96	Стабильная работа
20641-20700	1,41	2,09	1,04	1,05	1,00	1,00	Стабильная работа
20701-20760	1,50	2,06	1,01	0,97	0,97	1,03	Стабильная работа
20761-20820	1,42	2,11	1,12	0,97	0,76	1,02	Стабильная работа
20821-20880	1,22	2,15	0,94	1,05	0,98	0,89	Стабильная работа
20881-20940	1,29	2,08	0,96	0,91	1,15	1,07	Стабильная работа
20941-21000	1,43	2,14	0,95	1,09	1,36	0,94	Стабильная работа
21001-21060	1,51	2,09	1,00	0,99	0,79	0,99	Стабильная работа
21061-21120	1,49	2,11	0,95	1,01	1,28	1,04	Стабильная работа
21121-21180	1,42	2,03	1,09	0,96	0,45	0,99	Стабильная работа

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
21181-21240	1,46	2,09	1,23	1,00	11,00	8,17	Нестабильная работа
21241-21300	0,07	2,06	0,71	1,05	0,52	0,18	Стабильная работа
21301-21360	1,47	1,98	1,10	0,97	0,81	0,65	Стабильная работа
21361-21420	1,48	2,12	1,03	0,94	0,70	1,12	Стабильная работа
21421-21480	1,41	2,04	0,91	1,05	0,90	1,05	Стабильная работа
21481-21540	1,58	2,11	1,16	0,99	0,94	0,92	Стабильная работа
21541-21600	1,30	2,11	0,84	0,96	1,38	1,18	Стабильная работа
21601-21660	1,58	2,16	1,03	1,00	0,61	0,86	Стабильная работа
21661-21720	1,54	2,17	1,05	1,10	0,88	0,90	Стабильная работа
21721-21780	1,47	2,13	0,93	0,92	1,23	0,97	Стабильная работа
21781-21840	1,58	2,13	1,12	1,12	0,84	1,00	Стабильная работа
21841-21900	1,47	2,06	0,98	0,96	1,09	1,03	Стабильная работа
21901-21960	1,45	2,14	0,97	0,96	0,72	0,99	Стабильная работа
21961-22020	1,54	2,14	1,02	0,99	1,15	1,02	Стабильная работа
22021-22080	1,47	2,14	0,97	1,01	0,92	1,11	Стабильная работа
22081-22140	1,47	2,14	0,96	0,94	1,02	1,08	Стабильная работа
22141-22200	1,59	2,18	1,11	1,10	1,24	0,82	Стабильная работа
22201-22260	1,40	2,12	0,99	0,99	0,80	1,16	Стабильная работа
22261-22320	1,46	2,12	0,90	0,94	1,22	1,11	Стабильная работа
22321-22380	1,55	2,17	1,09	1,10	0,88	0,78	Стабильная работа
22381-22440	1,42	2,08	0,96	0,97	0,92	1,06	Стабильная работа
22441-22500	1,52	2,13	0,99	1,08	1,24	1,06	Стабильная работа
22501-22560	1,56	2,02	0,99	0,90	0,64	1,09	Стабильная работа
22561-22620	1,54	2,12	1,01	1,10	1,29	0,84	Стабильная работа
22621-22680	1,48	2,03	1,08	0,91	0,94	1,00	Стабильная работа
22681-22740	1,38	2,10	0,84	0,97	1,36	1,14	Стабильная работа
22741-22800	1,38	2,12	1,14	1,07	0,75	0,94	Стабильная работа
22801-22860	1,51	2,11	0,99	1,09	0,83	0,90	Стабильная работа
22861-22920	1,51	2,07	1,17	0,89	0,94	1,05	Стабильная работа
22921-22980	1,11	2,14	0,88	1,14	1,19	0,89	Стабильная работа
22981-23040	1,48	1,97	0,89	0,89	1,09	1,05	Стабильная работа
23041-23100	1,50	2,14	1,12	1,02	1,05	1,14	Стабильная работа
23101-23160	1,30	2,14	0,87	0,98	0,73	1,04	Стабильная работа
23161-23220	1,20	2,15	1,18	1,06	1,16	0,92	Стабильная работа
23221-23280	1,33	2,08	0,96	0,91	0,80	0,92	Стабильная работа
23281-23340	1,48	2,09	1,03	1,15	1,31	1,01	Стабильная работа
23341-23400	1,37	1,95	0,97	0,92	1,16	1,07	Стабильная работа
23401-23460	1,39	2,09	1,04	1,00	0,52	0,96	Стабильная работа
23461-23520	1,39	2,08	0,89	1,00	1,48	1,00	Стабильная работа
23521-23580	1,54	2,09	1,01	1,00	1,11	1,16	Стабильная работа
23581-23640	1,55	2,12	1,03	0,95	0,89	0,83	Стабильная работа
23641-23700	1,45	2,11	0,98	1,01	1,11	1,15	Стабильная работа
23701-23760	1,42	2,17	1,07	1,05	0,67	0,90	Стабильная работа
23761-23820	1,45	2,07	0,92	0,97	1,20	1,03	Стабильная работа
23821-23880	1,56	2,15	1,06	1,00	1,45	1,09	Стабильная работа

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
23881-23940	1,48	2,13	0,98	1,03	0,43	0,97	Стабильная работа
23941-24000	1,25	2,06	1,05	0,96	1,26	0,98	Стабильная работа
24001-24060	1,39	2,11	0,98	1,04	1,14	1,01	Стабильная работа
24061-24120	1,51	2,11	1,10	1,00	0,81	0,93	Стабильная работа
24121-24180	1,16	2,16	0,95	1,03	1,20	1,01	Стабильная работа
24181-24240	1,40	2,07	0,91	0,97	0,77	1,06	Стабильная работа
24241-24300	1,38	2,09	1,08	0,98	1,46	1,01	Стабильная работа
24301-24360	1,38	2,15	1,12	1,04	0,71	0,88	Стабильная работа
24361-24420	1,08	2,12	0,93	1,02	0,48	1,08	Стабильная работа
24421-24480	1,39	2,01	0,95	0,97	1,00	0,99	Стабильная работа
24481-24540	1,46	2,13	1,05	0,99	1,02	0,95	Стабильная работа
24541-24600	1,34	2,03	0,95	0,99	1,57	0,88	Стабильная работа
24601-24660	1,31	2,09	0,97	0,94	1,22	1,20	Стабильная работа
24661-24720	1,48	2,14	1,09	1,11	1,05	1,01	Стабильная работа
24721-24780	1,32	2,02	1,11	0,91	0,70	1,08	Стабильная работа
24781-24840	0,91	2,18	0,96	1,00	0,81	0,96	Стабильная работа
24841-24900	1,11	2,12	0,88	1,05	1,14	0,98	Стабильная работа
24901-24960	1,43	2,15	0,96	0,93	1,60	0,96	Нестабильная работа
24961-25020	1,51	2,08	1,09	1,04	1,11	1,14	Нестабильная работа
25021-25080	1,32	2,17	0,92	1,09	0,85	0,91	Стабильная работа
25081-25140	1,44	2,09	0,99	0,96	1,00	0,97	Стабильная работа
25141-25200	1,51	2,08	1,15	0,77	2,06	16,01	Нестабильная работа
25201-25260	0,67	0,81	0,85	1,11	0,50	0,62	Стабильная работа
25261-25320	1,52	0,67	1,06	1,11	1,20	0,11	Стабильная работа
25321-25380	1,41	1,98	1,12	1,13	0,51	0,98	Стабильная работа
25381-25440	1,25	2,06	0,95	1,00	0,82	1,02	Стабильная работа
25441-25500	1,41	2,04	1,07	0,94	1,40	0,98	Стабильная работа
25501-25560	1,21	2,12	0,42	0,19	3,83	4,93	Нестабильная работа
25561-25620	0,72	0,49	1,63	4,29	8,96	2,76	Нестабильная работа
25621-25680	0,49	1,77	0,98	1,26	0,40	0,07	Стабильная работа
25681-25740	1,30	2,07	1,23	1,00	0,59	1,14	Стабильная работа
25741-25800	1,59	2,11	1,02	1,04	0,44	0,92	Стабильная работа
25801-25860	1,35	2,02	1,05	0,96	0,93	0,95	Стабильная работа
25861-25920	1,53	2,07	1,00	0,94	1,14	1,11	Стабильная работа
25921-25980	1,48	2,12	1,01	1,08	0,99	1,07	Стабильная работа
25981-26040	1,41	1,92	1,01	0,96	1,14	0,96	Стабильная работа
26041-26100	1,48	2,06	1,04	1,05	1,08	1,15	Стабильная работа
26101-26160	1,46	2,01	0,95	1,00	0,89	0,87	Стабильная работа
26161-26220	1,34	2,08	1,09	0,92	0,82	0,97	Стабильная работа
26221-26280	1,41	2,11	0,96	1,00	0,72	0,95	Стабильная работа
26281-26340	1,45	2,17	0,98	0,98	1,17	0,96	Стабильная работа
26341-26400	1,49	2,17	1,00	1,03	1,22	0,92	Стабильная работа
26401-26460	1,48	2,14	1,02	1,01	0,89	1,13	Стабильная работа
26461-26520	1,44	2,16	1,01	1,01	0,87	0,86	Стабильная работа
26521-26580	1,45	2,10	0,94	0,99	1,09	1,16	Нестабильная работа

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
26581-26640	1,51	2,11	1,06	1,00	0,83	1,09	Нестабильная работа
26641-26700	1,35	2,02	0,92	1,00	1,60	0,86	Нестабильная работа
26701-26760	1,35	2,08	1,01	1,02	1,10	1,33	Нестабильная работа
26761-26820	1,53	1,99	-	-	2,64	10,48	Нестабильная работа
26821-26851	-	-	-	-	-	-	-

В результате расчетов примем, что в процессе фрезерования «окна» в ОК имеются диагнозы:

- D_1 – стабильная работа технической системы «ВЗД-ФИ»;
- D_2 – нестабильная работа технической системы «ВЗД-ФИ».

Простой признак K_j , встречающийся при этих диагнозах:

- K_1 – критерий диагностирования по энтропийному анализу;
- K_2 – критерий диагностирования по показателю Херста;
- K_3 – критерий диагностирования по Гуверу.

В этом случае, вероятность совместного появления событий можно определить по формуле (3.11) [26, 96, 166]:

$$G(D_i, K_j) = G(D_i)P(K_j/D_i) = G(K_j)G(D_i/K_j). \quad (3.11)$$

Тогда формула Байеса определяется как вероятность диагноза D_i при наличии признака K_j (3.12) [26, 96, 166, 167]:

$$G(D_i/K_j) = G(D_i) \frac{G(K_j/D_i)}{G(K_j)}, \quad (3.12)$$

где $G(D_i/K_j)$ – вероятность диагноза D_i после того, как будет известно наличие у диагностируемой системы критерия K_j ;

$P(D_i)$ – вероятность диагноза D_i , определяемая по статистическим данным, если предварительно обследовано N объектов и у N_i объектов имелось состояние D_i , то $P(D_i) = N_i/N$;

$G(K_j/D_i)$ – вероятность появления критерия K_j и объектов с состоянием D_i .

Принимая в рассмотрение, что техническая система «ВЗД-ФИ» обязательно находится в одном из состояний D_i , а реализация одновременно двух диагнозов невозможна, имеем формулу (3.13) [26, 96, 128, 165]:

$$\sum_{i=1}^n G(D_i/K^*) = 1. \quad (3.13)$$

Решение об отнесении состояния объекта диагностирования к одному из диагнозов D_i , может быть принято, если соблюдается неравенство (3.14):

$$G(D_i/K^*) \geq G_d, \quad (3.14)$$

где G_d – установленная надежность диагностирования, $G_d = 0,8 \div 0,9$.

При невыполнении условия (3.14) для принятия решения о техническом состоянии системы требуются дополнительные исследования. Если комплекс признаков (K^*) включает признаки $K_1, K_2, \dots, K_j$, то (3.15) [26, 96, 165, 167]:

$$G(K^*/D_i) = G(K^*_1/D_i) \cdot G(K^*_2/D_i) \cdot \dots \cdot G(K^*_j/D_i). \quad (3.15)$$

Одной из важных задач при оптимизации диагностирования является использование критериев с наибольшей диагностической ценностью, например, в результате обследования выявлено, что для данного состояния системы признак K_j имеет реализацию признака K_{jt} , тогда диагностический вес определяется по формуле (3.16) [96, 166]:

$$Z_{Di}(K_{jt}) = \log_2 \frac{G(K_{jt}/D_i)}{G(K_{jt})}, \quad (3.16)$$

где $G(K_{jt}/D_i)$ – вероятность попадания признака K_j в интервал « t » для системы с состоянием D_i ;

$G(K_{jt})$ – вероятность появления этого интервала у всех объектов с различными характеристиками.

В Таблицах 3.10, 3.11 приведены варианты диагностической матрицы Байеса, построенных по измерениям колебаний давления технологической жидкости, а в качестве независимых диагностических критериев для оценки технического состояния глубинного оборудования использованы: критерий диагностирования по энтропийному анализу ($KЭ_i$); критерий диагностирования по показателю Херста (KHe_i); критерий диагностирования по Гуверу (KHi).

При построении диагностической матрицы использован экспертный метод [131, 176], а область ее применения ограничивается пределами обработанного статистического материала для конкретных условий фрезерования «окна» в ОК диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм и группой прочности Д фрезерным инструментом диаметром 75 мм.

Таблица 3.10 – Диагностическая матрица по колебаниям давления технологической жидкости в процессе фрезерования обсадной колонны

Диагноз	Статистические показатели оценки технического состояния системы «ВЗД-ФИ», K_j														
	$KЭР$, критерий диагностирования по энтропийному анализу					$KHeP$, критерий диагностирования по показателю Херста					KHP , 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
$P(K_j)$	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 3.11 – Диагностическая матрица по колебаниям осевой нагрузки в процессе фрезерования обсадной колонны

Диагноз	Статистические показатели оценки технического состояния системы «ВЗД-ФИ», K_j														
	$KЭ_F$, 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
$P(K_j)$	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 величина Z_{D1} и Z_{D2} могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, при этом отрицательный диагностический вес – это отрицание данного диагноза для выбранного критерия на определенном интервале.

Диагностическая ценность обследования определяется по формуле (3.17) [26, 96, 166]:

$$Z_{Di}(K_j) = \sum_{S=1}^5 G(K_{jt}/D_i) \cdot Z_{Di}(K_{jt}). \quad (3.17)$$

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 процесса фрезерования по всем интервалам обследования Z_{Di} , которая заключается в определении вероятности диагнозов с учётом состояния технической системы «ВЗД-ФИ» для повышения эффективности её диагностирования.

Диагностическая ценность обследования, вносимая всеми реализациями признаков – K_{js} для состояния D_1 и D_2 при фрезеровании «окна» в ОК диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм и группой прочности Д фрезерным инструментом диаметром 75 мм по колебаниям давления технологической жидкости:

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

Диагностическая ценность обследования, вносимая всеми реализациями признаков – K_{js} для состояния D_1 и D_2 при фрезеровании «окна» в ОК диаметром 146 мм с толщиной стенки 8 мм и группой прочности Д фрезерным инструментом диаметром 75 мм по колебаниям осевой нагрузки:

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

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 промышленных условиях.

Выводы по третьей главе

1 Установлено, что разработанный критерий диагностирования, определенный по колебаниям технологической жидкости и осевой нагрузки, позволяет спрогнозировать различные технологические ситуации, которые могут возникнуть в процессе фрезерования ОК.

2 Выявлены технологические ситуации, сопровождающие работу технической системы «ВЗД-ФИ», возникающие при фрезеровании различных ОК, и соответствующие им значения критериев диагностирования.

3 Разработана автоматизированная программа на языке программирования «Python», предназначенная для определения работоспособности технической системы «ВЗД-ФИ» с помощью предложенного критерия диагностирования во время процесса фрезерования «окна» в ОК.

4 Разработаны варианты диагностической матрицы Байеса по колебаниям давления технологической жидкости и осевой нагрузки на фрезерный инструмент по статистически независимым критериям оценки состояния технической системы «ВЗД-ФИ» с последующим установлением диагностической ценности каждого критерия.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 А. с. № 1427059 А1 Союз Советских Социалистических Республик, МПК E21B 45/00. Способ определения степени износа породоразрушающего инструмента / Ишемгужин Е.И., Ямалиев В.У., Султанов Б.З. [и др.] ; заявитель Уфимский нефтяной институт. – № 4142241 : заявл. 08.09.1986 : опубл. 30.09.1988. – 3 с.
- 2 А. с. № 1506094 А1 Союз Советских Социалистических Республик, МПК E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / Ишемгужин Е.И., Султанов Б.З., Ямалиев В.У. [и др.] ; заявитель Уфимский нефтяной институт. – № 4301919 : заявл. 03.09.1987 : опубл. 07.09.1989. – 2 с.
- 3 А. с. № 1619770 А1 Союз Советских Социалистических Республик, МПК E21B 4/02. Способ контроля технического состояния винтового двигателя в забойных условиях / Молодило В.И., Дудкин М.П., Сурма К.Ю. [и др.] ; заявл. 28.06.1988. – 3 с.
- 4 А. с. № 1629455 А1 Союз Советских Социалистических Республик, МПК E21B 45/00. Способ определения степени износа опор турбобура / Ишемгужин Е.И., Султанов Б.З., Ямалиев В.У., Заикина О.А.; заявитель Уфимский нефтяной институт. – № 4391324 : заявл. 10.03.1988 : опубл. 23.02.1991. – 3 с.
- 5 А. с. № 1741918 А1 Союз Советских Социалистических Республик, МПК B04C 11/00. Способ оценки работоспособности гидроциклона / Ямалиев В.У., Ишемгужин Е.И., Брот А.Р. [и др.] ; заявитель Уфимский нефтяной институт. – № 4843211 : заявл. 21.05.1990 : опубл. 23.06.1992. – 3 с.
- 6 А. с. № 1800011А1 Союз Советских Социалистических Республик МПК E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / Мирзаджанзаде А.Х., Ишемгужин Е.И., Хасанов М.М. [и др.];

- заявитель Уфимский нефтяной институт – № 4910926; заявл. 12.02.1991; опубл. 07.03.1993. – 3 с.
- 7 А. с. № 962577А1 Союз Советских Социалистических Республик, МКИ Е 21 В 10/00. Фрезерное долото / Шахмаев З.М., Султанов Б.З., Лягов А.В. [и др.]. – № 3267218; заявл. 27.03.1981; опубл. 30.09.1982. – 3 с.
 - 8 Абдуллин, Н.М. Технологические особенности методов фрезерования обсадной колонны в вертикальных и наклонно-направленных скважинах / Н.М. Абдуллин // Бурение и нефть. – 2024. – № 1. – С. 24-27.
 - 9 Автоматизация технологических процессов работы породоразрушающего и фрезерного инструментов для технической системы «Перфобур» / Е.В. Шестакова, И.А. Лягов, Э.Я. Зинатуллина [и др.] // 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.
 - 10 Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Макарова, Ю.В. Грановский. – Москва : «Издательство «Наука», 1976. – 280 с.
 - 11 Акбулатов, Т. О. Определение расчетного радиуса искривления при работе роторных управляемых систем (РУС) / Т.О. Акбулатов, Л.М. Левинсон, Р.А. Хасанов // Территория Нефтегаз. – 2007. – №10. – С. 20-25.
 - 12 Анализ методов диагностики технического состояния шарошечных буровых долот корпусного типа / Д.А. Борейко, Д.Ю. Сериков, И.Ю. Быков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2021. – № 2 (122). – С. 11-14.
 - 13 Анализ причин осложнений при зарезке и креплении боковых стволов скважин / Г.А. Шлеин, В.Ю. Егоров, И.Д. Корунев // Молодой ученый. – 2019. – № 46 (284). – С. 72-76.

- 14 Анализ промыслового опыта по зарезке боковых стволов с применением оборудования различных сервисных компаний на объектах ПАО «Татнефть» / А.Л. Насыров, А.А. Мухаметшин, Р.Р. Саитбаталов, А.Ф. Гараева // Нефтяная провинция. – 2023. – № 2(34). – С. 150-164. – DOI 10.25689/NP.2023.2.150-164.
- 15 Аржанов, В.А. Устройства обработки сигналов беспроводных систем диагностики : практикум / В.А. Аржанов, А.П. Науменко. – Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. – 260 с.
- 16 Балденко Д.Ф. Винтовые забойные двигатели: справочное пособие / Д.Ф. Балденко, Ф.Д. Балденко, А.Н. Гноевых. – Москва: ОАО «Издательство «Недра», 1999. – 375 с.
- 17 Балицкий, П.В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины. – Москва : Недра, 1975. – 294 с.
- 18 Бендат, Д.Ж. Измерение и анализ случайных процессов / Д.Ж. Бендат, А. Пирсол. – Москва : Мир, 1974. – 464 с.
- 19 Беспалова, О.Е. Прогнозирование технического состояния динамически нагруженных узлов нефтегазового оборудования специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Беспалова, Ольга Евгеньевна. – Уфа, 2005. – 187 с.
- 20 Блехман, И.И. Вибрационная механика / И.И. Блехман. – Москва : Физматлит, 1994. – 400 с.
- 21 Блохин, А.В. Теория эксперимента. Курс лекций в двух частях: Часть 2. – Текст : электронный. – URL: <http://anubis.bsu.by/publications/elresources/Chemistry/blohin2.pdf> (дата обращения : 16.07.2024). – Электрон. текст. дан. (1,0 Мб). – Минск : Научно-методический центр «Электронная книга БГУ», 2003.
- 22 Бородкин, Н.Н. Моделирование поперечных колебаний концевой многолезвийного инструмента / Н.Н. Бородкин, В.Ю. Тимохина // Известия

- Тулъского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 579-583.
- 23 Булатасов, Э.О. Математическая модель фрезерования древесины / Э.О. Булатасов, В.П. Попов, В.П. Ханин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 4(179). – С. 210-215.
 - 24 Бурение наклонных скважин / А.Г. Калинин, Н.А. Григорян, Б.З. Султанов. – Справочник. – Москва: Недра, 1990. – С. 135-138.
 - 25 Бутенин, Н.В. Введение в теорию нелинейных колебаний : учеб. пособие для вузов / Н.В. Бутенин, Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев. – Москва : Наука, 1976. – 384 с.
 - 26 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.
 - 27 Воевидко, И.В. Особенности зарезки дополнительного ствола в эксплуатационной колонне скважины / И.В. Воевидко, И.И. Чудык // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014. – № 3. – С. 15-18.
 - 28 Воевидко, И.В. Прогнозирование искривления скважин при неориентированном бурении с использованием гидравлических забойных двигателей / И.В. Воевидко, И.И. Чудык // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 2. – С. 6-11.
 - 29 Габдрахимов, М.С. Исследование и оценка влияния неравномерности давления промывочной жидкости на работу бурового инструмента / М.С. Габдрахимов, Т.Н. Миннивалеев, Р.М. Галимов // Экспозиция Нефть Газ. – Набережные Челны, 2013. – № 2(27). – С. 65-67.
 - 30 Ганджумян, Р.А. К вопросу об изучении вибрации бурильной колонны как случайного процесса / Р.А. Ганджумян, С.Л. Симонянц // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – Москва: Изд-во ВНИИОЭНГ, 2018. – № 3. – С. 5-8.

- 31 Гареев, Р.Р. Совершенствование методов оценки технического состояния насосного и вентиляционного оборудования на установках комплексной подготовки газа : специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гареев Рустэм Рашитович; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т]. – Уфа, 2014. – 24 с.
- 32 Гасанов, А.П. Повышение эффективности работы фрезера-райбера при прорезании «окна» второго ствола в обсадной колонне высокопрочных труб / А.П. Гасанов, Д.Т. Нейматов, Т.А. Касумова // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2010. – № 4. – С. 31-33.
- 33 Геолого-промысловые и технологические критерии повышения нефтеизвлечения из сложно построенных терригенных коллекторов за счет бурения горизонтальных стволов на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами / Р.Х. Муслимов, Э.И. Сулейманов, Р.Г. Рамазанов [и др.] // Материалы Всероссийской конференции Ижевск, 1998. – С. 201-202.
- 34 Гилязов Р.М. Бурение нефтяных скважин с боковыми стволами. – Москва : Недра, 2002. – 255 с.
- 35 Гилязов, Р.М. Совершенствование техники и технологии бурения боковых стволов : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.15.10 / Башкирский научно-исследовательский и проектный институт нефти. – Уфа, 1999. – 21 с.
- 36 Голдбергер, Э.Л. Хаос и фракталы в физиологии человека / Э.Л. Голдбергер, Д.Р. Рирми, Б. Дж. Уэст // В мире науки. – 1990. – № 4. – С. 25-32.
- 37 Григорян, Н.А. Экономика бурения наклонных скважин / Н.А. Григорян, В.С. Григорян. – Москва : Недра, 1977. – 239 с.
- 38 Григулецкий, В.Г. Оптимальное управление при бурении скважин / В.Г. Григулецкий. – Москва : Недра, 1988. – 229 с.

- 39 Гулизаде, М.П. Основные принципы проектирования неориентированных КНБК для бурения вторых стволов в глубоких скважинах / М.П. Гулизаде, Ф. Сеид-рза // Азербайджанское нефт. хоз-во. – 1989. – № 11. – С. 21-22.
- 40 Данг, Х.Ч. Повышение эффективности концевой и торцевой фрезерования на основе контроля износа фрез по уровню вибрации : специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Данг Хыу Чонг, 2021. – 140 с.
- 41 Двойников, М.В. Проектирование траектории скважин для эффективного бурения роторными управляемыми системами // Записки Горного института. – 2018. – Т. 231. – С. 254-262. – DOI: 10.25515/PMI.2018.3.254.
- 42 Двойников, М.В. Технические и технологические решения, обеспечивающие устойчивую работу винтового забойного двигателя / М.В. Двойников, Ю.Д. Мураев // Записки Горного института. – 2016. – Т. 218. – С. 198-205.
- 43 Декларация о соответствии технического регламента Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» на Оборудование нефтепромысловое: установка «Перфобур», модели: УПБ-60.01-140/178-01. – № RU Д-RU.РА01.В.99049/21. от 28.05.2021.
- 44 Дерендяев, В.В. Разработка высокоскоростной системы передачи данных при управлении траекторией ствола скважины в процессе бурения / В.В. Дерендяев, А.А. Мелехин, С.Е. Чернышов // Бурение и нефть. – 2023. – № S1. – С. 41-43.
- 45 Дородное, И.П. Бурение второго ствола скважин эксцентричным долотом / И.П. Дородное, В.Г. Суховерхое // Реф. науч.-техн. сб Сер. Бурение. – № 8. – 1975. – С. 10-12.
- 46 Дохотеру, Б.В. Применение современных технологических средств оптимизации режимов бурения при строительстве наклонно-направленных и горизонтальных скважин / Б.В. Дохотеру, В.В. Салтыков // Инновационная наука. – 2022. – № 4-2. – С. 16-18.

- 47 Дьедни, А.К. О разуме, машинах и метафизике // В мире науки. – 1990. – № 2. – С. 82-86.
- 48 Задача спецпрактикума по теоретической. И прикладной механике. Аттрактор Лоренца / Н.В. Куликовская, В.М. Морозов. Под редакцией профессора Владимира Васильевича Александрова. – Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2022. – 22 с.
- 49 Зарезка боковых стволов как метод увеличения нефтеотдачи / К.В. Шешукова, А.А. Хайруллин // Научный форум. Сибирь. – 2016. – Т. 2. – № 4. – С. 73-74.
- 50 Зарипов, Д.Э. Анализ существующих твердых сплавов для оснащения породоразрушающего и фрезерного инструментов при бурении боковых стволов / Д.Э. Зарипов, Л.М. Левинсон // Актуальные проблемы инновационного развития. – 2017. – С. 687-690.
- 51 Зарипов, Д.Э. Совершенствование фрезерного инструмента при бурении боковых стволов / Д.Э. Зарипов, Т.И. Яфаров, Л.М. Левинсон // 69-я научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ – 2018. – С. 96-97.
- 52 Зарс, В.В. Моделирование автоколебаний металлорежущих станков // Вопросы динамики и прочности. Рита: Зинатне, 1969. – № 18. – С. 157-173.
- 53 Зорев, Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – Москва : Машгиз, 1956. – 368 с.
- 54 Зотов, А.Н. Исследование гидравлических вибрационных устройств для повышения эффективности работы скважинных насосов : специальность 05.04.07 «Машины и агрегаты нефтяной и газовой промышленности»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зотов Алексей Николаевич. – Уфа, 1994. – 22 с.
- 55 Имаева, Э.Ш. Вибронагруженность глубинного бурового оборудования при случайных колебаниях : специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и

- процессы (по отраслям)» : дисс. ... на соискание ученой степени кандидата технических наук / Имаева Эмма Шаукатовна. – Уфа, 2003. – 128 с.
- 56 Инструкция по бурению наклонных скважин с кустовых площадок на нефтяных месторождениях Западной Сибири : РД 39 0148070 - 6.027 - 86. – Тюмень: СибНИИНП, 1986. – 138 с.
 - 57 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.
 - 58 Испытания оконного фрезера ООО НПП «БУРИНТЕХ» на стенде ООО «ПЕРФОБУР» / А.С. Меджитов, А.В. Лягов, И.А. Лягов, Е.В. Шестакова // 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.
 - 59 История развития бурения горизонтальных скважин и боковых стволов. – Текст : электронный. – URL: https://vuzlit.com/393945/istoriya_razvitiya_bureniya_gorizontalnyh_skvazhin_bokovyh_stvolov#398 (дата обращения: 22.03.2022).
 - 60 Ишбаев, Г.Г. Скважинные фрезерные инструменты для ремонта скважин. – Уфа: Изд-во Фонда содействия развитию научных исследований, 1997. – С. 67-69.
 - 61 Ишемгузин, Е.И. Использование спектра колебаний давления промывочной жидкости для оценки технического состояния долота при турбинном бурении / Е.И. Ишемгузин, В.У. Ямалиев, Б.З. Султанов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1989. – № 5. – С. 31-34.
 - 62 Ишемгузин, И.Е. Выбросы случайных колебаний и их использование для оценки технического состояния глубинного оборудования для бурения скважин: специальность 05.04.07 «Машины и агрегаты нефтяной и газовой

- промышленности»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ишемгужин Игорь Евгеньевич. – Уфа, 1998. – 156 с.
- 63 Ишемгужин, И.Е. Оценка технического состояния глубинного бурового оборудования с использованием выбросов случайных колебаний осевой нагрузки / И.Е. Ишемгужин, Э.Ш. Имаева // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2003. – № 1. – С. 1-8.
 - 64 Кагарманов, Н.Ф. Вскрытие продуктивных пластов горизонтальными скважинами / Н.Ф. Кагарманов, М.Р. Давлетбаев, В.Х. Самигуллин [и др.] // Межвузовский тематический сб. науч. тр. – Уфа : УГНТУ, 1996. – 103 с.
 - 65 Кагарманов, Н.Ф. Механизм разрушения пород при горизонтальном бурении / Н.Ф. Кагарманов // Тр. 5-й Всесоюзной науч.-техн. конференции. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Уфа. – 1990. – С. 76.
 - 66 Козловский, Е.А. Кибернетика в бурении / Е.А. Козловский, В.М. Питерский, М.А. Комаров. – Москва : «Недра», 1982. – 298 с.
 - 67 Крепление скважин на месторождениях ОАО «АНК «Башнефть». Технологический регламент : РД 16-1528 3860–008–2004. – Уфа, 2004. – 119 с. – Текст : непосредственный.
 - 68 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.
 - 69 Кусов, Г.В. Перспективы разработки Самбургского нефтегазоконденсатного месторождения. Особенности резки боковых стволов / Г.В. Кусов, Д.А. Березовский, О.В. Савенок // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2017. – № 3. – С. 73-99.
 - 70 Ленков, С.Н. Диагностирование состояния цепного привода на основе статистического анализа вибросигналов / С.Н. Ленков, В.У. Ямалиев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19. – № 1-2. – С. 251-255.

- 71 Ленков, С.Н. Оценка технического состояния и совершенствование цепного привода скважинного штангового насоса : специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ленков Станислав Николаевич; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т]. – Уфа, 2019. – 162 с.
- 72 Ломов, А.П. Снижение аварийности при фрезеровании обсадной колонны. Снижение затрат времени при освоении скважины / А.П. Ломов // Бурение и нефть. – 2011. – № 7-8. – С. 12-13.
- 73 Лужанский, Д.А. Оценка влияния конструктивно-геометрических параметров и вибрационных характеристик концевых дереворежущих фрез на качество обработки материала : специальность 05.21.05 «Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лужанский Дмитрий Анатольевич, 2020. – 120 с.
- 74 Лягов, А.В. Антивибрационные-стабилизирующие компоновки бурильной колонны для технической системы «Перфобур» / А.В. Лягов, И.А. Лягов, И.Н. Сулейманов // SOCAR Proccedings. – Баку, 2020. – № 4. – С. 24–32.
- 75 Лягов, А.В. Выбор допустимых радиусов кривизны скважин сверхмалого диаметра (каналов) для технической системы «Перфобур» / А.В. Лягов, И.А. Лягов // Экспозиция Нефть Газ. – 2014. – № 6(38). – С. 47-52.
- 76 Лягов, А.В. Динамические компоновки для бурения забойными двигателями : специальность 05.02.13. «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лягов Александр Васильевич. – Уфа, 2005. – 480 с.
- 77 Лягов, А.В. Антивибрационные – стабилизирующие компоновки бурильной колонны для технической системы «Перфобур» / А.В. Лягов, И.А. Лягов, И.Н. Сулейманов // SOCAR Proceedings. – Азербайджан, 2021. – №14. – С. 24-32.

- 78 Лягов, И.А. Выбор необходимого количества промывочных переводников в специальной компоновке и исследование их работы при бурении радиально-разветвленных каналов секционными винтовыми двигателями / И.А. Лягов, А.В. Лягов, Д.Р. Исангулов, А.А. Лягова // Записки Горного института, 2024. – Т. 265. – С. 78-86.
- 79 Лягов, И.А. Методология расчета технической эффективности силовых секций малогабаритных винтовых забойных двигателей для системы «Перфобур»/ И.А. Лягов, Ф.Д. Балденко, А.В. Лягов [и др.] // Записки Горного института, 2019. – 240. – С. 694-700.
- 80 Лягов, И.А. Обоснование и разработка технологии вторичного вскрытия продуктивных пластов разветвленными скважинами сверхмалого диаметра : специальность 25.00.15 «Технология бурения и освоения скважин» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лягов Илья Александрович; [Место защиты: Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный»]. – Санкт-Петербург, 2014. – 211 с.
- 81 Лягов, И.А. Технология вскрытия продуктивных пластов скважины бурением каналов малого диаметра и радиуса кривизны/ И.А. Лягов, М.А. Лягова // Сборник материалов конференции и выставки SPE по разработке месторождений в осложненных условиях и Арктике. – Москва : Society of Petroleum Engineers, 2013. – С.835-873.
- 82 Лягов, И.А. Анализ результатов промысловых испытаний технической системы «Перфобур». Аналитический синтез базовых узлов «Перфобура» повышенной надежности для бурения сверхдлинных каналов по прогнозируемой траектории / И.А. Лягов //Научно-технический журнал «Нефтегазовое дело». – 2014. – Т. 12. – № 1. – С. 54-72.
- 83 Лягова, М.А. Компоновка перфобура для бурения глубоких каналов специальными винтовыми двигателями малого диаметра : специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лягова Марина

- Александровна; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т]. – Уфа, 2012. – 167 с.
- 84 Лягова, М.А. Совершенствование технологии вторичного вскрытия и освоения скважин / М.А. Лягова, А.В. Лягов, Е.Л. Маликов [и др.] // Нефтегазовое дело: Электрон. журн. – Уфа. – 2011. – № 6. – С. 160-173.
 - 85 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, Октябрьский, 2022. – С. 408-414.
 - 86 Мальцев, А.А. Разработка инновационной системы радиального бурения для повышения нефтеотдачи пласта / А.А. Мальцев, И.А. Лягов, А.В. Лягов // Нефть. Газ. Новации. – 2016. – № 11. – С. 67-71.
 - 87 Мамалимова, И.Р. Оценка технического состояния породоразрушающего инструмента путем анализа временных рядов технологических параметров процесса бурения / И.Р. Мамалимова, В.У. Ямалиев // Наука и технологии в нефтегазовом деле: тезисы докладов II Международной научно-практической конференции. – Армавир: Изд-во КубГТУ, 2020. – С. 77-80.
 - 88 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 др.] // Бурение и нефть. – № 4, 2025. – С. 28-36. – DOI:10.62994/2072-4799.2025.73.18.004
 - 89 Методы анализа временных рядов / Н.А. Хованова, И.А. Хованов : учебное пособие. Издательство : Государственного учебно-научного центра «Колледж»; Саратов, 2001. – 120 с. – ISBN 5-900641-98-8.
 - 90 Мирзаджанзаде, А.Х. Динамические процессы в нефтегазодобыче / А.Х. Мирзаджанзаде, А.Х. Шахвердиев. – Москва : Наука, 1997. – 256 с.

- 91 Мирзаджанзаде, А.Х. Теория колебаний в нефтепромысловом деле / А.Х. Мирзаджанзаде, З.Г. Керимов, М.Г. Копейкис. – Москва : Недра, 2005. – 364 с.
- 92 Мирзаджанзаде, А.Х. Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи. Нелинейность. Неравновесность. Неоднородность / А.Х. Мирзаджанзаде, М.М. Хасанов, Р.Н. Бахтизин. – Уфа: ГИЛЕМ, 1999. – 462 с.
- 93 Мирсалаев, С.Б. Техника и технология зарезки второго ствола скважин. – Москва : «Недра», 1967 г. – 64 с.
- 94 Молодило, В.И. Автоматизация процесса бурения скважин с использованием винтовых забойных двигателей / В.И. Молодило, Ю.А. Коротаев, А.Ю. Медведев // НТЖ Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2002. – №1-2. – С.17-21.
- 95 Мухаметшин, А.А. Совершенствование технологии зарезки боковых стволов на основе разработки гидромеханических клиновых отклонителей : дис. ... кандидата технических наук : 25.00.15 / Мухаметшин Алмаз Адгамович; Татар. науч.-исслед. и проек. ин-т нефти. – Бугульма, 2009. – 148 с.
- 96 Науменко, А.П. Вероятностно-статистические методы принятия решений : теория, примеры, задачи : учебное пособие / А.П. Науменко, И.С. Кудрявцева, А.И. Одинец. – Омск : ОмГТУ, 2018. – 108 с. – ISBN 978-5-8149-2720-0.
- 97 О породоразрушающих и фрезерных инструментах / 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. 64.
- 98 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.

- 99 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. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-5-526-527.
- 100 Оборудование и инструмент для зарезки боковых стволов / О.В. Тихонов, М. Рыбальченко // Технология ТЭК. – 2006. – № 3. – С. 46-47.
- 101 Оптимизация технологий разработки нефтяных и газовых месторождений посредством нетрадиционной системы ГС / Н.Ф. Кагарманов, Е.М. Тимашев, Т.Г. Бердин // Материалы седьмого Европейского симпозиума по увеличению нефтеотдачи пластов. Москва, 1993. – Т. 2. – С. 148-159.
- 102 Опыт и результаты системного совершенствования традиционных технологий строительства нефтяных и газовых скважин / В.Н. Поляков, Г.Г. Ишбаев, Г.Г. Гиладев [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2018. – № 12. – С. 13-18. – DOI 10.30713/0130-3872-2018-12-13-18.
- 103 Организация наземного канала связи для системы передачи данных в процессе бурения / С.В. Емец, А.Н. Краснов, М.Ю. Прахова, Ю.В. Калашник // Нефтегазовое дело. – 2021. – Т. 19. – № 6. – С. 34-45.
- 104 Орловский, С.Л. Опыт применения и перспективы бурения боковых стволов на объекте ЮС Русскинского месторождения // Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения. – 2017. – С. 68-71.
- 105 Освоение скважин по технологии компании «Перфобур» / Е.В. Шестакова, И.А. Лягов, В.С. Полухин [и др.] // 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.
- 106 Паспорт ВЗД ДОТ-54РС.800 №7015 от 05.04.2023 / Фирма «Радиус-Сервис». – Пермь, 2023. – 44 с.

- 107 Патент № 195139 U1 Российская Федерация, МПК E21B 4/02, E21B 21/00, E21B 7/04. Бурильная компоновка с малогабаритным гидравлическим забойным двигателем / Лягов А.В., Лягов И.А.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Перфобур». – № 2019120556 : заявл. 25.12.2017 : опубл. 15.01.2020. – Бюл. № 2. – 17 с.
- 108 Патент № 2029049 C1 Российская Федерация МПК E21B 10/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / Ямалиев В.У., Ишемгужин Е.И., Брот А.Р. [и др.]; патентообладатель Уфимский нефтяной институт – № 4844173/03; заявл. 21.05.1990; опубл. 20.02.1995 – 5 с.
- 109 Патент № 2124125 C1 Российская Федерация, МПК E21B 44/00, E21B 45/00. Способ регулирования оптимальной осевой нагрузки на долото при бурении скважин / Ишемгужин И.Е., Ямалиев В.У., Пашинский В.В. [и др.] ; патентообладатель Уфимский государственный нефтяной технический университет. – № 97103910/03 : заявл. 12.03.1997 : опубл. 27.12.1998. – 5 с.
- 110 Патент № 217542 C1 Российской Федерации, МПК F01C 1/16. Героторный механизм рабочих органов объемной гидравлической машины / Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д., Лягов И.А. [и др.]. – 2022127178; заявлено 19.10.2022; опубл. 04.04.2023. – Бюл. № 10. – 5 с.
- 111 Патент № 2182659C1 Российская Федерация МПК E21B 44/06, E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / Мирзаджанзаде А.Х., Ямалиев В.У., Хасанов М.М. [и др.]; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ЮганскНИПИнефть». – № 2001107329/03; заявл. 19.03.2001; опубл. 20.05.2002. – 2 с.
- 112 Патент № 2183266C1 Российская Федерация МПК E21B 44/06, E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / Ямалиев В.У., Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М. [и др.];

- патентообладатель «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – № 2000124651/03; заявл. 27.09.2000; опубл. 10.06.2002 – 5 с.
- 113 Патент № 2188939 С1 Российская Федерация МПК E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / Ямалиев В.У., Хасанов М.М., Якупов Р.Н. [и др.]; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ЮганскНИПИнефть» – № 2001113974/03; заявл. 25.05.2001; опубл. 10.09.2002 – 11 с.
- 114 Патент № 2321737 С1 Российская Федерация, МПК E21B 44/06. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / Ишемгузин Е.И., Надыршин Р.Ф., Зинатуллина Э.Я. [и др.] ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – № 2006124726/03 : заявл. 10.07.2006 : опубл. 10.04.2008. – 5 с.
- 115 Патент № 2335629 С1 Российская Федерация, МПК E21B 44/00. Устройство для оценки состояния породоразрушающего инструмента / Ямалиев В.У., Салахов Т.Р., Имаева Э.Ш.; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – № 2006145009/03 : заявл. 18.12.2006 : опубл. 10.10.2008. – 10 с.
- 116 Патент № 2674485 С1 Российская Федерация, МПК E21B 4/02. Малогабаритный шпиндель секционного винтового забойного двигателя / Лягов А.В., Лягов И.А., Соболев Д.Г. [и др.]; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Перфобур». – № 2017141481; заявл. 29.11.2017; опубл. 11.12.2018; Бюл. – № 35. – 37 с.
- 117 Патент № 2739875 С1 Российская Федерация, МПК E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / Ямалиев В.У., Мамалимова И.Р.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский

- государственный нефтяной технический университет». – № 2020116660 : заявл. 12.05.2020 : опубл. 29.12.2020. – 11 с.
- 118 Патент № 2764966 С2 Российская Федерация, МПК E21B 44/00 (2006.01). Способ компоновки бурильной колонны для вторичного вскрытия продуктивного пласта / Лягов И.А., Лягов А.В., Качемаева М.А.; патентообладатель Перфобур Инк. – № 2020119343; заявл. 22.10.2019; опубл. 24.01.2022. – Бюл. № 3. – 20 с.
- 119 Патент № 2778910 С1 Российской Федерации, МПК E21B 19/08. Устройство для создания осевой нагрузки в компоновке бурильной колонны / Лягов А.В., Лягов И.А., Качемаева М.А. – 2020119344; заявлено 07.02.2020; опубл. 29.08.2022, Бюл. № 34. – 5 с.
- 120 Патент № 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; опубл. 17.05.2024. – Бюл. № 14. – 14 с.
- 121 Повышение эффективности зарезки и бурения второго ствола в добывающих скважинах / Ф.А. Гусейнов, А.М. Расулов, Т.М. Гасанов, Б.Б. Гулиев. – Москва : ВНИИОЭНГ, 1985. – Вып. 12. – 48 с.
- 122 Прогнозирование рисков заклинивания для исключения возможности прихватов технической системы «Перфобур» при бурении разветвленных каналов в терригенных коллекторах / И.А. Лягов, А.Г. Губайдуллин, А.В. Лягов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 10. – С. 126-136. – DOI 10.18799/24131830/2019/10/2304.

- 123 Результаты эксплуатации комплекса инструмента «КГБ» для забуривания боковых стволов за один рейс / В.Х. Самигуллин, Р.М. Гилязов // Нефтяное хозяйство. – 2007. – № 4. – С. 25-27.
- 124 Савченко, А.В. Техника и технология проведения зарезки боковых стволов на месторождении Самотлор / А.В. Савченко, Д.А. Березовский // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2018. – № 3. – С. 97-120.
- 125 Салахов, Т.Р. Методическое и экспериментальное обеспечение диагностирования состояния породоразрушающего инструмента в процессе бурения : специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Салахов Тагир Рамилевич ; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т]. – Уфа, 2008. – 129 с.
- 126 Салахов, Т.Р. Обеспечение диагностирования состояния породоразрушающего инструмента в процессе бурения нефтегазовых скважин (на примере скважин Туймазинского управления буровых работ) / Т.Р. Салахов, В.У. Ямалиев // Нефтегазовое дело. – Уфа, 2010. – № 2. – С. 45-50.
- 127 Самигуллин, В.Х. Зарезка боковых стволов в сложных геолого-технических условиях / В.Х. Самигуллин, Л.М. Левинсон, И.М. Хамитов [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2007. – № 12. – С. 26-28.
- 128 Самотой, А.К. Предупреждение и ликвидация прихватов труб при бурении скважин. – Москва : Недра, 1979. – 182 с.
- 129 Светуньков, С.Г. Методы маркетинговых исследований. – Санкт-Петербург.: Изд-во ДНК, 2003. – 352 с.
- 130 Свинин, В.М. Имитационное моделирование колебаний технологической системы при торцовом фрезеровании с модулированной скоростью резания. Высокие технологии в машиностроении, материалы Всероссийской научн-техн конференции. – Самара, 2007. – С. 187-189.

- 131 Симонов, В.В. Влияние колебательных процессов на работу бурильного инструмента / В.В. Симонов, Е.К. Юнин. – Москва : Недра, 1977. – 217 с.
- 132 Системы телеметрии в горизонтальном бурении: опыт российских компаний // Нефтегазовая промышленность. – 2022. – С. 44-50. – Текст : электронный. – URL : https://dprom.online/wpcontent/uploads/2022/09/2_2022_NP.pdf (дата обращения : 26.10.2024).
- 133 Скважинные фрезеры. Буровой портал. – Текст: электронный. – URL: <http://www.drillings.ru/skvfrezer> (дата обращения : 16.05.2022).
- 134 Совершенствование технологии забуривания новых стволов из обсаженных скважин/ М.О. Ашрафьян, Н.М. Саркисов, Н.Б. Савенок // Нефтяное хозяйство. – 1989. – № 6. – С. 34-38.
- 135 Создание Технической системы «Перфобур» и исследование её работы в сильно искривленном канале при вынужденных продольных колебаниях / И.А. Лягов, А.В. Лягов, И.Н. Сулейманов, М.А. Качемаева // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело, 2015. – № 5. – С. 45-105.
- 136 Специальный винтовой забойный двигатель для технической системы «Перфобур» / И.А. Лягов, Д.Г. Соболев, А.В. Лягов, Ф.Д. Балденко // Бурение и нефть. – 2022. – № 7-8. – С. 22-27.
- 137 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.
- 138 Сулакшин, С.С. Решение геолого-технических задач при направленном бурении скважин / С.С. Сулакшин, В.В. Кривошеев, В.И. Рязанов. – Москва : Недра, 1989. – 167 с.
- 139 Сургучев, М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов / М.Л. Сургучев. – Москва : Недра, 1985. – 308 с.
- 140 Тарасян, В.С. Исследование динамических процессов в одной модели фрезерования / В.С. Тарасян // Известия Уральского государственного

- университета. Серия: Математика и механика. – 2006. – № 10(46). – С. 187-195.
- 141 Техника и технология создания сверхглубоких перфорационных каналов / А.В. Лягов, Н.А. Шамов, Д.В. Пантелеев [и др.] // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн, 2012. – №2. – С.131-174.
 - 142 Техническая система «Перфобур» для вторичного вскрытия продуктивного пласта / И.А. Лягов, А.В. Лягов, В.В. Шайдаков [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2022. – № 2 (350). – С. 47-52.
 - 143 Технология повторного вскрытия пласта методом радиального бурения каналов с использованием технической системы «Перфобур» / А.А. Рязанов, А.С. Ермаков, В.А. Папиж [и др.] // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 5(653). – С. 5-12. – DOI 10.33285/0207-2351-2023-5(653)-5-12.
 - 144 Технология повторного вскрытия пласта методом радиального бурения каналов с использованием технической системы «Перфобур» / А.А. Рязанов, А.С. Ермаков, В.А. Папиж [и др.] // Бурение и нефть. – 2023. – № 5. – С. 12-17.
 - 145 Технология радиального бурения каналов как метод восстановления аварийного фонда скважин / А.А. Рязанов, А.С. Ермаков, И.А. Лягов [и др.] // Инженер-нефтяник. – 2024. – № S5. – С. 166-171.
 - 146 Тихонов, С. ТРИЗ и налоги. Стимулы и препятствия для разработки трудноизвлекаемых запасов // Нефтегазовая вертикаль. Национальный отраслевой журнал. – Текст : электронный. – URL: <http://www.ngv.ru/magazines/article/triz-i-nalogi/> (дата обращения 12.04.2022).
 - 147 Федоренко, И.Я. Использование модели Лоренца для описания процесса смешивания сыпучих кормовых материалов / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков, Р.А. Котов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 9(83). – С. 81-85.

- 148 Формирование окна в обсадной колонне и дальнейшее бурение бокового ствола скважины на Киринском гКм / М.Ф. Нуриев, О.В. Уваров, М.В. Максимов [и др.] // Газовая промышленность. – 2018. – № 10(775). – С. 26-32.
- 149 Хазова, Ю.А. «Элементы теории бифуркаций. Часть 2. Теория хаоса»: учебно-методическое пособие / Ю.А. Хазова – ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского». – Симферополь, 2019. – 54 с.
- 150 Хасанов, А.Ф. Анализ преимуществ и недостатков методов забурирования боковых стволов / А.Ф. Хасанов, Л.М. Левинсон // Инновационные научные исследования в современном мире – 2019. – С. 111-116.
- 151 Хасанов, А.Ф. Анализ эффективности зарезки боковых стволов системой «Over Head» / А.Ф. Хасанов, М.Р. Гаттарова // Интеграция науки, общества, производства и промышленности – 2019. – С. 144-147.
- 152 Хасанов, М.М. Вейвлет-анализ в задаче диагностирования нефтепромыслового оборудования / М.М. Хасанов, Р.Н. Якупов, В.У. Ямалиев // Вестник Инжинирингового центра ЮКОС. – 2001. – № 2. – С. 22-25.
- 153 Хасанов, Р.А. Совершенствование технологии проводки скважин сложного профиля при использовании телеметрических и роторных управляемых систем/ Специальность 25.00.15 «Технология бурения и освоения скважин» диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Уфа, 2021. – 179 с.
- 154 Холопов, Е.А. Техника и технология восстановления продуктивности скважины № 1273 Уренгойского месторождения путём зарезки бокового ствола / Е.А. Холопов, С.В. Шиян, С.В. Мусийченко, К.А. Назаренко // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2020. – №2. – С. 248-266.

- 155 Численное моделирование и метод планирования вычислительных экспериментов: учебное пособие / В.М. Конюхов, А.Н. Чекалин, И.В. Конюхов. – Казань: Вестфалика, 2022. – 32 с.
- 156 Шайдаков, В.В. Безотказность винтовых забойных двигателей / В.В. Шайдаков, В.А. Шулепов, Е.В. Шестакова // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море (ВАК) Всероссийский научно-исследовательский институт организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности. – Москва, 2020. – № 9 (333). – С. 21-24.
- 157 Шестакова, Е.В. О различных подходах использования фрезерного инструмента // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – 5. – С.
- 158 Шостак, А.В. Разработка технических средств, технологических приемов и методов мониторинга проводки направленных скважин : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 25.00.15 / Шостак Андрей Валерьевич; Сев.-Кавказ. гос. техн. ун-т. – Ставрополь, 2011. – 24 с.
- 159 Шубин, С.С. Методическое и экспериментальное обеспечение технического состояния установок электроцентробежных насосов в процессе эксплуатации : специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шубин Станислав Сергеевич; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т]. – Уфа, 2014. – 24 с.
- 160 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; опубл. 03.09.2024. – Бюл. № 9.

- 161 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; опубл. 27.11.2024. – Бюл. № 12.
- 162 Ямалиев, В.У. Вероятностный подход распознавания состояний объектов управления / В.У. Ямалиев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2001. – № 2. – С. 1-8.
- 163 Ямалиев, В.У. О возможности распознавания технических состояний глубинного бурового оборудования / В.У. Ямалиев, Э.Ш. Имаева, Т.Р. Салахов // Нефтегазовое дело. – 2005. – № 3. – С. 127-132.
- 164 Ямалиев, В.У. Определение технического состояния динамического оборудования по результатам диагностических измерений / В.У. Ямалиев, Р.Р. Гареев // Нефтегазовое дело. – 2012. – Т. 10. – № 3. – С. 78-82.
- 165 Ямалиев, В.У. Применение элементов теории детерминированного хаоса к решению задач технического диагностирования УЭЦН / В.У. Ямалиев, Т.Р. Салахов, С.С. Шубин // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2014. – № 4. – С. 174-191.
- 166 Ямалиев, В.У. Эксплуатационно-технологическая оценка состояния глубинного бурового оборудования : специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ямалиев Виль Узбекович. – Уфа, 2002. – 311 с.
- 167 Analytical research and experimental tests on the technology for drilling small diameter channels with small radius of curvature / I.A. Lyagov, N.I. Vasilev, M. Reich, M. Mezzetti // Oil Gas European Magazine. – 1 September 2014. – V. 40. – Iss. 3. – P. 124-129.

- 168 Bashirov, A.I. Combination of radial drilling technology with acid jetting: New approach in carbonate reservoir stimulation / A.I. Bashirov, I.A. Lyagov, I.R. Galas// Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2020. – UAE, 2022. – p. 15.
- 169 Galas, I.R. The Method of Directional Radial Drilling of Channels for Stimulation of Oil Rim / I.R. Galas, A.I. Bashirov, V.A. Makarenko [et al.] // Society of Petroleum Engineers. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2022. – UAE, 2022. – p. 12.
- 170 Jinwu ZHANG Practice and understanding of sidetracking horizontal drilling in old wells in Sulige Gas Field, NW China / Jinwu ZHANG, Guoyong WANG, Kai HE, Chenglin YE // Petroleum Exploration and Development – 2019. – Vol. 149. – №2 – P. 384-392.
- 171 Liagov, I. Optimization of the configuration of the power sections of special small-sized positive displacement motors for deep-penetrating perforation using the technical system «Perfobore» / I. Liagov, A. Liagov, A. Liagova // Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – Vol. 11, No. 11. – Pp. 49-77. – DOI 10.3390/app11114977.
- 172 Liagova, A.A. The technology of completion reservoir by drilling a network of branched channels under controlled trajectory / A.A. Liagova, I.A. Liagov// Youth Technical Sessions Proceedings. Proceedings of the 6th Youth Forum of the World Petroleum Council- Future Leaders Forum. – 2019. – P. 345–351
- 173 Lorenz, E.N. Deterministic non-Periodic Flow / Journal of the Atmospheric Sciences, 1963. – Vol. 20(2). – Pp. 130-141.
- 174 Methodology for calculating technical efficiency of power sections in small-sized screw downhole motors for the «Perfobur» system / I.A. Lyagov, F.D. Baldenko, A.V. Lyagov [et al.] // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 240. – P. 694-700. – DOI 10.31897/PMI.2019.6.694.
- 175 Owen, E.W. Trek of the Oil Finders, Tulsa, Okla : American Association of Petroleum Geologists, 1975. – 12 p.

- 176 Yamaliev, V. About the deep drilling equipment technical condition recognition method / V. Yamaliev, E. Imaeva, T. Salakhov // Oil and Gas business. – 2009. – Vol. 1. – P. 1-27.
- 177 Yamalyiev, V. Evaluation procedure of technical condition of deep drilling equipment with use of neural networks / V. Yamalyiev, E. Imayeva, T. Salakhov // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2007. – No. 2. – P. 42.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Патент на изобретение



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Справка о внедрении результатов исследования

ООО «Перфобур»
117405, Россия, г. Москва, Варшавское
шоссе, 160к3, помещение 9/1
Телефон / факс: +7 (499) 649-39-00
E-mail: info@perfobur.com
www.perfobur.com



Офис в г.Уфа:
450522, Россия, г. Уфа
Село Зубово, ул. Центральная 184 ст1
Телефон / факс: +7 (499) 649-39-00
E-mail: info@perfobur.com
www.perfobur.ru

Исх. № 24/05-В-ПБ от 24.05.2024

В диссертационный совет 24.2.428.05
при ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный
нефтяной технический университет»
ул. Космонавтов, д. 1, г. Уфа,
РБ, Россия, 450064

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы
Шестаковой Евгении Владимировны

Настоящей справкой ООО «Перфобур» подтверждает, что результаты диссертационной работы Шестаковой Евгении Владимировны на тему «Вероятностно-статистическая оценка технической системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при проведении стендовых испытаний (акты 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) 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 работоспособности по Гуверу для основных технологических ситуаций, возникающих в процессе фрезерования.

Генеральный директор ООО «Перфобур»

И.А. Лягов



ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2024680895

**Автоматизированная программа определения
технического состояния фрезерного инструмента**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический
университет» (RU)*

Авторы: *Шестакова Евгения Владимировна (RU), Лягов
Илья Александрович (RU), Ямалиев Виль Узбекович (RU),
Лягов Александр Васильевич (RU)*

Заявка № **2024663609**
Дата поступления **14 июня 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **03 сентября 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024688420

**Автоматизированная программа определения
технического состояния оборудования в процессе
фрезерования обсадной колонны**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический
университет» (RU)*

Авторы: *Шестакова Евгения Владимировна (RU), Ямалиев Виль
Узбекович (RU), Лягов Александр Васильевич (RU), Лягов
Илья Александрович (RU)*



Заявка № 2024686829

Дата поступления 11 ноября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 ноября 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

**Данные интервала записи колебаний технологических параметров в
процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне**

Таблица Г.1 – Данные по фрезерованию ОК 146 мм фрезой 75 мм

№	F, Н	P, кгс/см ²	№	F, Н	P, кгс/см ²	№	F, Н	P, кгс/см ²	№	F, Н	P, кгс/см ²
1	0	5,89	8341	1095	44,04	16801	1572	42,38	26792	2607	54,64
2	42	5,28	8342	745	40,97	16802	2186	42,74	26793	2502	55,60
3	79	5,86	8343	1496	42,72	16803	1995	41,43	26794	2018	52,37
4	0	5,33	8344	1541	42,84	16804	1818	36,36	26795	1261	50,35
5	56	5,71	8345	1283	45,38	16805	2885	39,58	26796	1865	49,78
6	77	5,46	8346	1385	42,14	16806	2306	41,13	26797	1706	52,48
7	0	5,67	8347	1530	43,66	16807	1798	40,62	26798	1486	50,47
8	71	5,52	8348	919	43,93	16808	1990	39,59	26799	2049	54,27
9	0	5,60	8349	1761	39,50	16809	1377	42,20	26800	1705	50,31
10	3	5,62	8350	1143	44,25	16810	1515	43,17	26801	1223	50,22
11	78	5,49	8351	1207	42,76	16811	709	43,30	26802	2441	51,37
12	0	5,68	8352	783	43,52	16812	2170	37,40	26803	2520	50,67
13	46	5,41	8353	1402	41,34	16813	2728	38,43	26804	1202	49,80
14	0	5,94	8354	1577	46,63	16814	2754	41,54	26805	2385	46,27
15	0	5,32	8355	924	40,32	16815	2450	41,44	26806	1718	49,88
16	68	5,94	8356	1442	39,88	16816	2605	41,56	26807	1152	48,46
17	0	5,08	8357	1430	45,88	16817	2049	40,99	26808	1992	48,83
18	1	5,86	8358	1137	43,79	16818	2409	42,63	26809	1704	48,96
19	80	5,24	8359	720	44,36	16819	2818	43,87	26810	1647	48,53
20	0	5,83	8360	1374	42,36	16820	2673	43,41	26811	1993	49,90
21	49	5,36	8361	992	42,65	16821	2753	41,12	26812	1662	49,99
22	0	5,70	8362	928	41,11	16822	2958	37,99	26813	1123	47,08
23	0	5,59	8363	1526	40,00	16823	2375	40,09	26814	2178	49,14
24	76	5,50	8364	968	46,54	16824	2929	40,77	26815	1767	47,13
25	0	5,72	8365	1057	41,50	16825	2542	40,79	26816	2076	47,29
26	45	5,40	8366	1345	44,53	16826	1698	44,25	26817	1566	45,67
27	76	5,81	8367	1348	43,73	16827	2078	43,42	26818	1686	43,11
28	991	79,21	8368	1142	42,46	16828	2301	44,13	26819	1989	44,43
29	991	80,35	8369	1212	42,10	16829	2076	42,59	26820	1458	44,97
30	1032	80,75	8370	1385	41,42	16830	2632	39,37	26821	2275	47,71
31	981	79,33	8371	865	43,72	16831	2304	41,87	26822	1295	47,33
32	1019	78,29	8372	994	42,19	16832	2480	39,53	26823	2295	48,64
33	995	77,61	8373	1498	43,48	16833	2462	41,41	26824	1969	49,35
34	979	78,75	8374	1448	45,55	16834	2605	39,32	26825	1460	49,06

Продолжение таблицы Г.1

[illegible]

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(справочное)

Справка о внедрении результатов исследования в учебный процесс

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
 ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»)**

Ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450064. Тел.: (347) 242-03-70, <http://www.rusoil.net>, E-mail: info@rusoil.net
 ИНН 0277006179, ОГРН 1020203079016, ОКПО 02069450, КПП 027701001

30.11.2023 № 051-38/17

На № _____ от _____

СПРАВКА

О практическом использовании результатов диссертационной работы

Шестаковой Евгении Владимировны

Результаты диссертационной работы, полученные при личном участии Шестаковой Евгении Владимировны на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов», представленные в виде учебного пособия «Вероятностно-статистическая оценка состояния бурового оборудования» Уфа: УНПЦ «Изд-во УГНТУ», 2023. – 49 с., применяются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» при преподавании дисциплин «Эксплуатация и оценка технического состояния оборудования нефтегазового производства» и «Эксплуатация и диагностика нефтегазопромыслового оборудования» для магистрантов, обучающихся по программам «Проектирование, эксплуатация и диагностика технологических процессов и объектов нефтегазового производства», «Сервисное обслуживание и капитальный ремонт скважин» и «Технический контроль и диагностирование объектов и сооружений нефтегазового комплекса» по направлению 21.04.01 «Нефтегазовое дело».

Проректор по учебно-методической работе

А.И. Могучев



Латыпов Булат Маратович
 8(347)260-57-31

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. У. Ямалиев, Е. В. Шестакова

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие

Уфа
УНПЦ «Издательство УГНТУ»
2023

УДК 622.24.05(07)
ББК 33.13я7
Я 54

Утверждено Редакционно-издательским советом УГНТУ
в качестве учебного пособия

Рецензенты:
Доцент Лениногорского филиала Казанского национального
исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева-КАИ
канд. техн. наук О. Ю. Павлова
Ведущий инженер по новым технологиям отдела добычи нефти и газа
ПАО АНК «Башнефть»
канд. техн. наук С. С. Шубин

Ямалиев, В. У.

К 54 Вероятностно-статистическая оценка состояния бурового оборудования:
учеб. пособие / В. У. Ямалиев, Е. В. Шестакова. – Уфа: УНПЦ «Изда-
тельство УГНТУ», 2023. – 48 с.
ISBN 978-5-7831-2319-1

Учебное пособие, соответствующее ФГОС 3++, предназначено для студентов очной формы обучения, обучающихся по направлению 21.04.01 Нефтегазовое дело магистерских программ: «Проектирование, эксплуатация и диагностика технологических процессов и объектов нефтегазового производства» и «Сервисное обслуживание и капитальный ремонт скважин» при изучении дисциплины «Эксплуатация и оценка технического состояния оборудования нефтегазового производства», а также магистерской программы: «Технический контроль и диагностирование объектов и сооружений нефтегазового комплекса» при изучении дисциплины «Эксплуатация и диагностика нефтегазопромыслового оборудования».

В учебном пособии приведена информация об анализе временных рядов и диагностических критериях для оценки технического состояния бурового оборудования.

УДК 622.24.05(07)
ББК 33.13я7

ISBN 978-5-7831-2319-1

© ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет», 2023
© Ямалиев В. У., Шестакова Е. В., 2023