

На правах рукописи

**МОСКВИН СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОСТОЯНИЯ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ**

Специальность 25.00.15 - Технология бурения и освоения скважин

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2003

Работа выполнена на кафедре нефтегазопромыслового оборудования Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Научный руководитель                    доктор технических наук, профессор  
Султанов Байрак Закиевич.

Официальные оппоненты:            доктор технических наук  
Ишбаев Гниятулла Гарифуллович;  
кандидат технических наук  
Солодовников Дмитрий Сергеевич.

Ведущая организация                    Альметьевский государственный нефтяной институт.

Защита состоится « 29 » июня 2004 года в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан « 25 » мая 2004 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ибрагимов И. Г.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

На современном этапе развития техники большое внимание уделяется диагностике машин и агрегатов, оценке технического состояния и прогнозированию остаточного ресурса.

При бурении скважин наиболее сложным объектом для диагностирования является глубинное оборудование – забойный двигатель и породоразрушающий инструмент. Для практики бурения знание и особенно прогнозирование состояния забойного оборудования в процессе работы позволяет избежать многих осложнений при бурении, полнее использовать ресурс забойного двигателя и долота. Информация о состоянии долота является ценной, поскольку аварии, связанные с породоразрушающим инструментом, считаются одними из самых сложных.

Поэтому оценка степени изношенности долота и прогнозирование времени его работы до отказа является актуальной задачей, решение которой позволит значительно повысить надежность процесса проводки скважины, снизить аварийность и улучшить технико-экономические показатели бурения.

### **Цель работы**

Разработка методики оценки технического состояния и прогнозирования отказа породоразрушающего инструмента в процессе бурения.

### **Основные задачи исследования**

- 1 Анализ существующих методов оценки технического состояния глубинного бурового оборудования.
- 2 Экспериментальное исследование работы бурильного инструмента в процессе бурения скважины.
- 3 Разработка критериев оценки технического состояния долота.
- 4 Разработка способа определения технического состояния долота в процессе бурения.
- 5 Разработка способа прогнозирования отказа породоразрушающего инструмента в процессе бурения.

### **Научная новизна работы**

- 1 Для оценки состояния породоразрушающего инструмента впервые предложен дихотомический метод распознавания образов.
- 2 Построена регрессионная экспоненциальная модель, характеризующая зависимость информативных признаков, полученных из спектров продольных и поперечных колебаний бурильной колонны, от технического состояния долота.
- 3 Разработан критерий оценки технического состояния долота, который определяется как отношение значений регрессионной экспоненциальной модели в начале и в процессе бурения.

### **Методы решения задач**

Поставленные задачи решались с использованием методов спектрального анализа, вероятностно-статистических методов обработки информации, методов регрессионного анализа, методов распознавания образов.

### **Основные защищаемые положения**

Методика оценки и прогнозирования технического состояния долота в процессе бурения с использованием дихотомического метода распознавания образов.

### **Практическая ценность**

- 1 Разработана методика оценки технического состояния и прогнозирования отказа породоразрушающего инструмента в процессе бурения с использованием методов распознавания образов, которая используется в Азнакаевском филиале ООО «Татнефть-бурение» - Азнакаевском управлении буровых работ.
- 2 Разработано программное обеспечение для прогнозирования отказа породоразрушающего инструмента, которое используется в учебном процессе филиала УГНТУ в г.Октябрьском.

### **Апробация работы**

Основные положения работы докладывались и обсуждались на научно-практическом семинаре «Опыт, проблемы и перспективы внедрения виброакустических методов контроля и диагностики машин и агрегатов» (Октябрьский, февраль 2000); Втором Международном симпозиуме «Наука и технология углеводородных дисперсных систем» (Уфа, октябрь 2000); IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии в

машиностроении-2003» (Пенза, февраль 2003); научно-технической конференции «АлНИ-2002» (Альметьевск, апрель 2003); Международной научно-технической конференции «Современные информационные технологии» (Пенза, май 2003).

### **Публикации**

Основные положения диссертационной работы отражены в 11 публикациях, из которых 8 статей и 3 тезиса.

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы. Работа изложена на 140 страницах, включает 43 рисунка, 12 таблиц, 99 наименований литературы, а также три приложения.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна выполненных исследований и их практическая значимость.

**В первой главе** проведен обзор способов и методов оценки технического состояния глубинного бурового оборудования, рассмотрены каналы связи, по которым получают информацию с забоя при бурении скважины, а также приводятся сведения об информационно-интеллектуальных системах на базе ЭВМ, разработанных и (или) применяемых на современном этапе развития бурения.

Глубинное буровое оборудование представляет собой машинный агрегат, который состоит из рабочей машины – долота, и забойного двигателя, преобразующего подводимую по колонне энергию во вращательное движение долота. Отказ машинного агрегата, причиной которого является отказ долота или забойного двигателя, приводит к остановке процесса бурения. Как показывает практика, долото является наиболее изнашиваемым элементом машинного агрегата, и основной причиной выхода долота из строя является износ вооружения и опор. Поэтому необходимо производить оценку степени износа долота при бурении как наиболее изнашиваемого элемента машинного агрегата.

В процессе бурения долото генерирует колебания, распространяющиеся по бурильной колонне и столбу промывочной жидкости. Бурильная колонна и столб промывочной жидкости в этом случае являются каналом передачи информации.

Изучением каналов связи с забоем, получением и интерпретацией информации в процессе бурения занимались А.В. Алиев, Т.М. Алиев, В.П. Варламов, А.С. Галеев, Б.А. Грачев, Ю.В. Грачев, И.Л. Гуреев, Т.П. Даева, В.И. Демихов, В.Е. Копылов, А.И. Леонов, А.Г. Мамиконов, А.М. Мелик-Шахназаров, К.Б. Пальчик, А.А. Погарский, Г.И. Рзаева, Ю.А. Савиных, А.Г. Черемных, В.П. Чупров, Ю.К. Шлык и многие другие. Получение информации с забоя возможно по беспроводному электромагнитному, проводному электрическому, гидравлическому, акустическому и механическому каналам. В результате работ этих авторов созданы забойные телеметрические системы, использующие искусственно созданные электропроводный и беспроводный электромагнитный канал, а также естественный гидравлический канал. Сейсмический канал - по горной породе, и механический канал - по бурильной колонне, нашли применение в основном в исследовательских работах. Одно из существенных различий каналов - наличие или отсутствие забойной аппаратуры для ввода информации в канал. Для беспроводного электромагнитного и проводного электрического каналов такая забойная аппаратура является неотъемлемой частью системы передачи информации, для остальных каналов забойная аппаратура не требуется, что является существенным преимуществом. Поэтому гидравлический и механический каналы являются естественным источником информации о забойных процессах, передаваемых по бурильной колонне в виде продольных, поперечных и крутильных колебаний, и по столбу промывочной жидкости в виде колебаний промывочной жидкости. Забойная информация, передаваемая по каналам связи, содержит сведения о техническом состоянии элементов глубинного оборудования.

Значительный вклад в изучение вопросов оценки технического состояния забойного бурового оборудования внесли работы следующих авторов: В.А. Бражникова, Е.Г. Иванова, Е.И. Ишемгужина, В.П. Милованова, Г.Н. Семенцова, Б.З. Султанова, В.У. Ямалиева и других.

Для оценки технического состояния долота предложены различные критерии. Некоторые критерии связаны с оценкой рейсовой, механической, мгновенной скорости бурения, с проходкой долота, с оценкой уровня удельных энергозатрат (бурение электробуром). Другие критерии получены при оценке параметров случайных колебаний осевой нагрузки и давления промывочной жидкости в

диапазоне инфранизких частот. Известен критерий, позволяющий определять заклинивание опор шарошек по крутильным автоколебаниям, возникающим в момент заклинивания опор.

При исследованиях колебаний наземной части бурильной колонны с целью контроля процесса бурения (И.Л. Гуреев, В.Е. Копылов) установлено, что по колебаниям бурильной колонны можно оценивать износ вооружения долота, однако в дальнейшем это направление не развивалось.

Прогнозирование аварий при бурении, методы прогнозирования и диагностики глубинного оборудования в нефтяной промышленности рассматриваются в работах Р.Б. Алекперова, Т.А. Алиева, И.Р. Байкова, Р.А. Гасанова, В.Г. Деева, Ш.И. Мамедова, Г.Н. Меджидова, А.Х. Мирзаджанзаде, Е.А. Смородова и других.

Для прогнозирования аварий используются различные системы на базе ЭВМ. Системы технологического контроля процесса бурения, которые состоят в основном из наземной аппаратуры (например, «Леуза 1», АО НПФ «Геофизика», Уфа), позволяют распознавать в автоматическом режиме до 10 аварийных нештатных ситуаций. Существуют системы для прогнозирования показателей бурения и прогнозирования аварий на основе оценки имеющихся технологических параметров – осевой нагрузки, крутящего момента на роторе, механической скорости бурения, расхода и давления промывочной жидкости на входе циркуляционной системы, качественных параметров промывочной жидкости.

По результатам обзора сделаны следующие выводы. Естественными каналами получения информации о техническом состоянии долота являются механический и гидравлический каналы. Механический канал недостаточно используется для оценки технического состояния долота, поэтому необходимо провести исследования в этой области. Вибрация бурильной колонны как источник информации в информационных системах для бурения не используется.

**Во второй главе** рассмотрены условия формирования и передачи сигнала от объекта диагностирования к датчику, методы обработки информации для оценки технического состояния долота.

Установлены следующие особенности породоразрушающего инструмента как объекта диагностирования, обусловленные спецификой эксплуатации. Объект

диагностирования является элементом сложной забойной динамической системы, которую технически сложно оснастить системой сбора информации с установкой датчиков на каждый её элемент. Поэтому для получения информации об объекте в виде сигналов колебаний бурильной колонны и промывочной жидкости более подходят механический и гидравлический каналы, так как забойная аппаратура для ввода информации в канал не требуется.

Объект диагностирования в процессе бурения постоянно удаляется от места положения датчика, поэтому протяженность канала, по которому передается информация от объекта до датчика, постоянно увеличивается. На регистрируемый сигнал, который несет истинную информацию, влияют случайные факторы (осевая нагрузка, тип породы), канал связи (акустические свойства механического и в меньшей степени гидравлического каналов изменяются в процессе бурения). Наличие случайных факторов требует применение вероятностно-статистических методов при анализе сигналов, а в совокупности с влиянием канала усложняет обработку сигнала из-за наличия помех и постановку диагноза для породоразрушающего инструмента.

Сигнал, регистрируемый на устье, очень сложен, но его можно представить в виде суммы гармонических сигналов. Рассмотрим типовой сигнал (рисунок 1), в котором присутствуют колебательные процессы с частотой 4, 10, 100, 300Гц, их гармоники, модулированные сигналы, шумовая компонента. Мощность исходного сигнала распределяется по множеству гармоник.

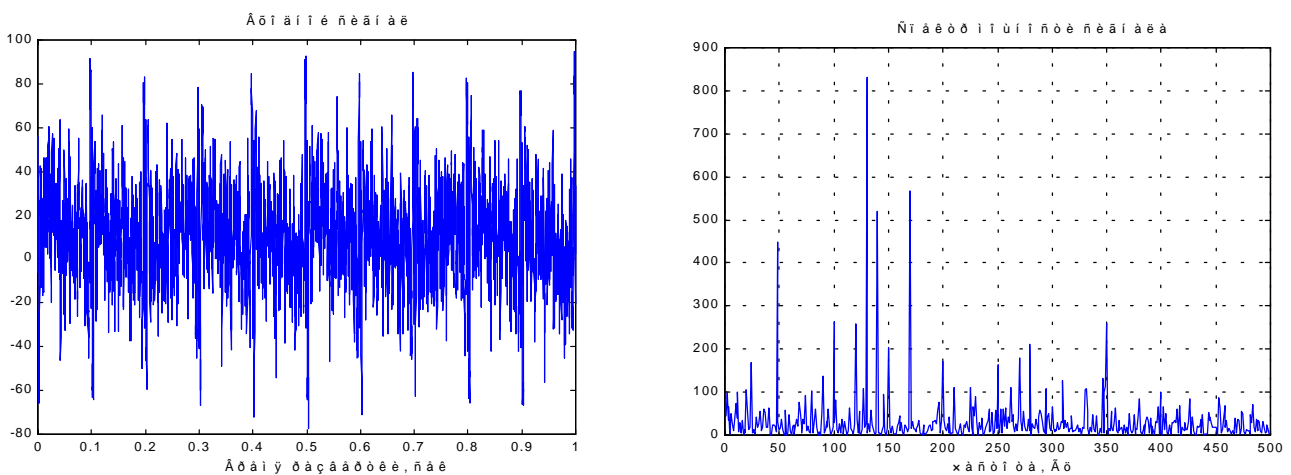


Рисунок 1 - Типовой сигнал (слева), результат быстрого преобразования Фурье - БПФ (справа)

Для обработки сигналов, аналогичных типовому сигналу, лучше использовать простые методы обработки, к которым относится вычисление площади спектра.

Анализируя изменения во времени площади спектра, можно установить зависимость площади спектра от износа долота. Площадь спектра оценивается численным интегрированием амплитуды спектра по дискретным частотам:

$$S = \int_0^{f_{zp}} a(f) df, \text{ и может быть разложена в ряд}$$

$$S = \frac{h}{3} (a_0 + 4a_1 + 2a_2 + 4a_3 + \dots + 2a_{n-2} + 4a_{n-1} + a_n), \quad (1)$$

где  $a$  – амплитуда колебаний на  $i$ -й частоте;  $h$  – шаг дискретизации.

В качестве диагностических критериев используются числовые характеристики случайной величины - площади спектра. Это оценки математического ожидания

$$\text{площади спектра } M\{S\} = \sum_{i=1}^n S_i / n, \text{ дисперсии } D\{S\} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M\{S\})^2 \text{ и среднего}$$

квадратического отклонения площади спектра  $\sigma = \sqrt{D\{S\}}$ , коэффициента вариации

$$k_v = \frac{\sigma}{M\{S\}}, \text{ асимметрии } A_S = \frac{1}{\sigma^3} [M(S - M\{S\})^3] \text{ и эксцесса площади спектра}$$

$$E_k = \frac{1}{\sigma^4} [M(S - M\{S\})^4] - 3.$$

Исходя из того, что в сигнале при регистрации присутствует большое количество помех, обусловленных изменяющимися условиями бурения, возможна ситуация «отсутствия» характерных диагностических признаков для идентификации состояния системы, когда нет очевидного соответствия между параметрами технического состояния и параметрами виброакустического сигнала. В этом случае, для оценки состояния системы необходим адаптирующийся метод, в качестве которого привлекается дихотомический метод распознавания образов. Процесс распознавания образов состоит из двух частей: обучения определенным правилам, по которым производится распознавание, и сам процесс распознавания. После обучения метода распознавания исследуемый образ (состояние объекта) при помощи разделяющей

функции (РФ) и правила причисления объектов к одному из классов относятся к определенному состоянию или диагнозу.

По виду разделяющей функции метод распознавания относится к методу группового принятия решений, т.е. используется мажоритарный принцип. Разделяющей функцией является синтезируемая мажоритарная функция – это логическая (переключательная) функция, которая принимает значение большинства входящих в нее аргументов. Мажоритарная функция позволяет производить разделение классов с максимальной достоверностью при наличии ряда бинарных признаков со случайным характером изменения величин. В случае задачи оценки состояния долота, аргументами разделяющей мажоритарной функции являются амплитудные оценки частот продольной и поперечной вибрации ведущей бурильной трубы, пульсации промывочной жидкости.

Для анализа реального сигнала принимаются следующие допущения. Долото может иметь два возможных технических состояния – исправное и неисправное; процесс бурения ведется в заданном режиме, параметры которого не превышают заданных технологических норм; для оценки состояния долота рассматриваются только сигналы, полученные при взаимодействии долота с забоем; функция износа долота монотонна и имеет непрерывно возрастающую компоненту.

**В третьей главе** рассмотрен анализ площади спектра продольных и поперечных колебаний колонны, пульсации промывочной жидкости, полученных в результате промысловых экспериментов. Во время промысловых экспериментов проведены замеры колебаний бурильной колонны и промывочной жидкости в процессе бурения различными компоновками.

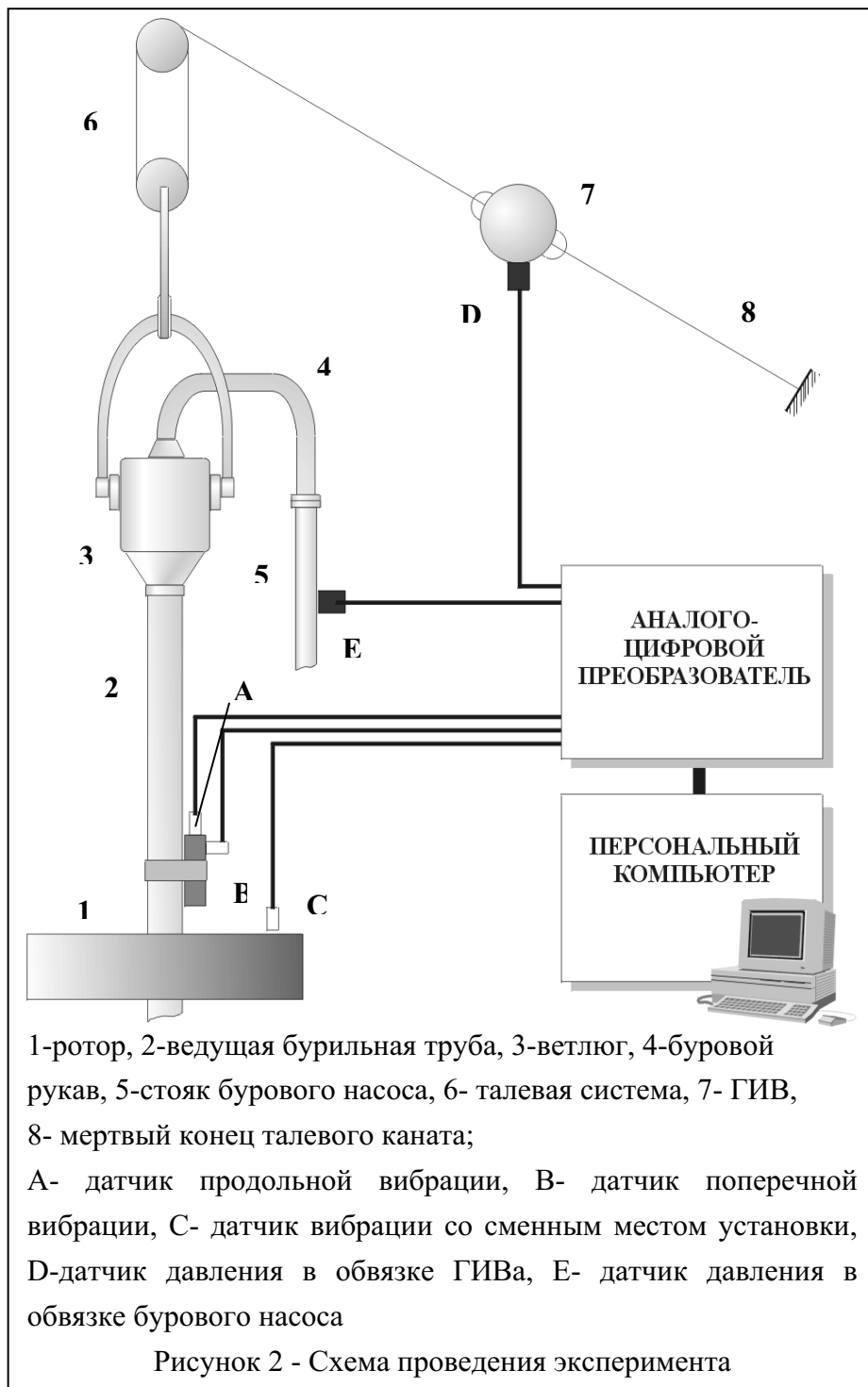
Для проведения промысловых замеров колебаний на буровой установке применялся измерительный комплекс на базе персонального компьютера. Комплекс обеспечивал регистрацию колебаний бурильной колонны, пульсации давления промывочной жидкости, колебаний осевой нагрузки, запись и хранение информации, возможна также обработка записанных сигналов. Датчики давления для регистрации осевой нагрузки и пульсации промывочной жидкости должны были обеспечить диапазон давлений 0...25 МПа. Для регистрации использовались полумостовые датчики давления на тензорезисторах ПДМТ-25 с допустимым давлением до 25 МПа.

Колебания бурильной колонны регистрировались акселерометрами типа ДН-5 и ДН-3, которые работают в диапазоне 5..500 Гц и 5..4000 Гц соответственно. Для исключения низкочастотных сигналов использовались фильтры низких частот. Для преобразования аналоговой информации, поступающей от датчиков, в цифровую, используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП) NVL03 фирмы «Сигнал»(г. Москва). Конструктивно АЦП представляет собой плату расширения для IBM-совместимого компьютера. Программное обеспечение включает в себя несколько модулей, обеспечивающих в диалоговой форме следующие режимы работы: ввод сигнала (три режима по выбору), хранение сигнала, анализ сигнала. Сигналы записываются сериями по 20 записей, в каждой записи одновременно может записываться и храниться до пяти сигналов. Каждая запись представляет собой файл объемом около 100 Кб. Сигналы хранятся в пятиуровневой базе данных, максимальный объем которой 20000 записей (1000 серий по 20 записей).

Схема проведения замеров представлена на рисунке 2. Измеряли продольную и поперечную вибрацию ведущей бурильной трубы, пульсацию бурового раствора, колебания осевой нагрузки.

Датчики для измерения продольной (А) и поперечной (В) вибрации колонны закреплялись на ведущей бурильной трубе. Замеры проводились в процессе проработки пробуренного ствола скважины, во время бурения на разных глубинах турбобуром или винтовым забойным двигателем, при промывке, а также при подъеме колонны для смены забойной компоновки. Отработано шесть долот, три долота диаметром 295,9 мм и три долота диаметром 215,9 мм. При замене долота производился его осмотр и оценивался износ долота по коду.

Износ долот комбинированный, неисправности сочетаются друг с другом, приводя к разнообразным комбинациям диагнозов. Поэтому оценивалось техническое состояние долота в целом, не вдаваясь в конкретную причину неисправного состояния. Анализ площади спектра продольных и поперечных колебаний ведущей бурильной трубы и пульсации промывочной жидкости проводился в интервалах частот от 2 до 50 Гц (низкочастотный диапазон), от 50 до 500 Гц (среднечастотный диапазон), и от 500 до 700 Гц (высокочастотный диапазон).



Выбор интервалов частот обусловлен тем, что группы частот забойного происхождения в указанных диапазонах колебаний, имеющих условные границы, связаны с работой трехшарошечного долота. При вращении долота и движении шарошек по неровному забою возбуждаются колебания в низкочастотном диапазоне с условными границами от 5 до 50 Гц. В среднечастотном и высокочастотном диапазонах с условными границами от 50 до 500 Гц и выше возбуждаются колебания, связанные с ударами зубьев долота о забой. По каждой серии записей сигналов

определяли числовые характеристики случайной величины - площади спектра. Цель анализа - установление закономерности между износом долота и числовыми характеристиками площади спектра в принятых диапазонах. Из полученных числовых характеристик наиболее информативными оказались математическое ожидание и эксцесс площади спектра колебаний бурильной колонны.

В пульсации бурового раствора по принятым интервалам не выявлено никаких закономерностей.

Математическое ожидание площади спектра продольных и поперечных колебаний уменьшается при изменении режима работы бурильной колонны, которое обусловлено уменьшением осевой нагрузки, сильным износом долота (рисунок 3), прихватом инструмента (рисунок 4), потерей циркуляции (рисунок 5). Уменьшение площади спектра хорошо видно по аппроксимирующей кривой. Аппроксимирующая функция представляет многочлен третьей степени  $\varphi(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$ , где  $\varphi(x)$ - аппроксимирующая функция,  $a_j$ -коэффициенты, полученные методом наименьших квадратов.

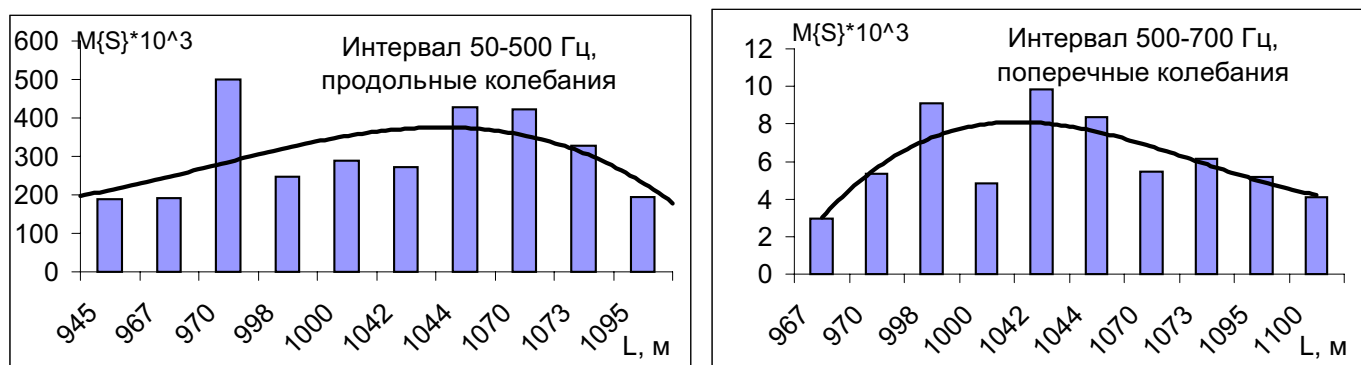


Рисунок 3- Математическое ожидание площади спектра при бурении без осложнений, долото отказало на глубине 1100 м

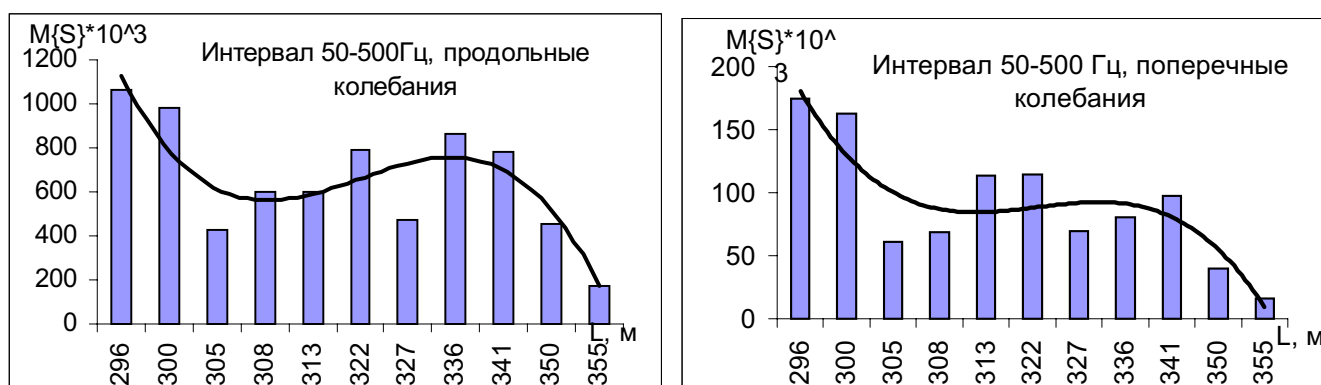


Рисунок 4 - Математическое ожидание площади спектра при прихвате инструмента на глубине 355 м

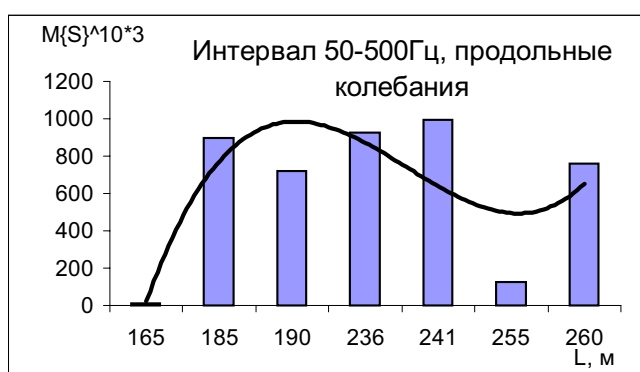


Рисунок 5 – Снижение площади спектра при потере циркуляции на глубине 255 м

Анализ эксцесса площади спектра продольных колебаний показал, что эксцесс при износе долота уменьшается (интервал 2) или остается постоянным (интервал 3) (рисунок 6). При изменении

режима работы буровой колонны отношение эксцесса к предыдущему значению сильно увеличивается. Например, при изменении осевой нагрузки (глубина 1070 м), (см. рисунок 6) значение эксцесса увеличилось в 3 раза, при прихвате на глубине 1132 м значение эксцесса вырастает более чем в 8 раз по отношению к предыдущему значению. В результате снижения давления в циркуляционной системе буровой установки при бурении на глубине 255 м эксцесс увеличился в 3,5 раза (рисунок 7).

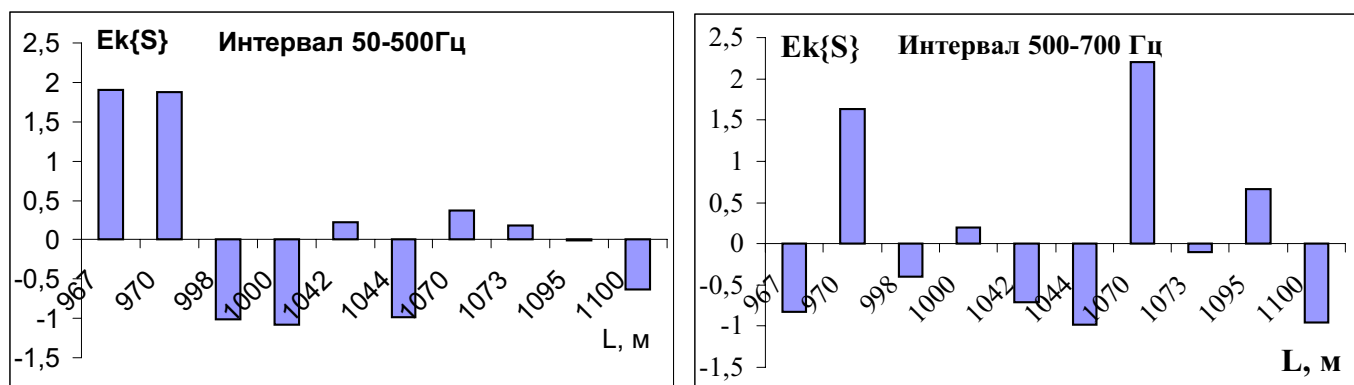


Рисунок 6 - Изменение эксцесса по глубине

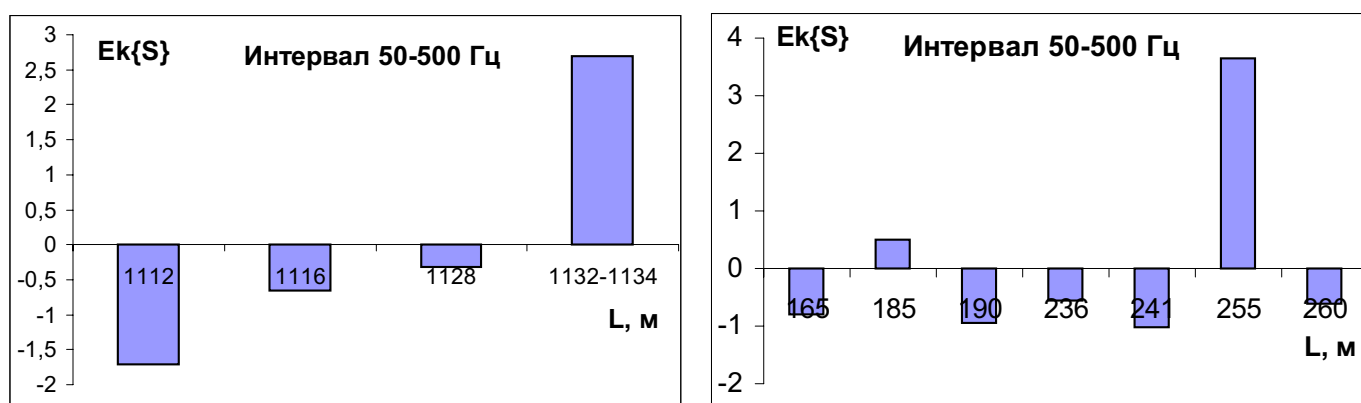


Рисунок 7 - Изменение эксцесса при аварии на глубине 1130 м (слева) и при снижении давления промывочной жидкости на глубине 255 м (справа)

В результате анализа числовых характеристик площади спектра установлено, что значения математического ожидания и эксцесса площади спектра колебаний буровой колонны зависят от следующих факторов: износа долота, осевой нагрузки, изменения давления промывочной жидкости, взаимодействия колонны со стенками скважины, то есть факторов, характеризующих условия работы буровой колонны. Изменение условий бурения приводит к изменению рассмотренных информативных признаков, поэтому необходим адаптирующийся к условиям бурения подход для получения информативных признаков (критериев) оценки состояния долота.

**В четвертой главе** приводится результат разработки критерия оценки технического состояния долота в процессе бурения при применении адаптирующегося к условиям бурения метода распознавания образов.

Взаимодействие долота с забоем проявляется в виде колебаний бурильной колонны и промывочной жидкости в диапазонах частот, которые связаны с вращением корпуса долота, вращением шарошек и ударами зубцов о породу. Диапазоны эти коррелированы друг с другом в различной степени, и отличаются для различных типов долот, компоновок, условий бурения.

Обработанный процедурой БПФ сигнал представляет спектр колебаний. Частоты спектра образуют множество  $GF = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_N\}$ , которому соответствует множество амплитуд  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_N\}$ , где  $N$  - номер частоты.

В процессе долбления множество  $GF$  единое для любого спектра, а множество амплитуд  $A$  индивидуальное для каждого спектра, то есть после каждого замера образуется множество  $A_t$ , где  $t = 1..n$  - порядковый номер замера. При помощи дихотомического метода распознавания образов решается задача кластеризации, или деления на классы. Один класс – это замеры (реализации) одной серии (например, первой серии  $t=1$ ) с множеством амплитуд  $A_1$ , второй класс – это замеры другой серии с номером  $t$  с другим набором амплитуд  $A_t$ . Дихотомическим методом распознавания образов из множества  $GF$  выбираются  $k$  частот, которым соответствует наибольшее изменение элементов множеств  $A_t$  по отношению к соответствующим элементам множества  $A_1$ . Выбранные  $k$  частот формируют множество  $G_t = \{f_{t1}, f_{t2}, f_{t3}, \dots, f_{tm}\}$ , количество элементов которого всегда постоянно и равно десяти ( $k=10$ ), элементы называются информативными частотами,  $m=1..10$  - номер информативной частоты. Амплитуды, соответствующие элементам множества  $G_t$ , формируют из множеств  $A_1$  и  $A_t$  соответственно множества  $A_{C1} = \{a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1m}\}$  и  $A_{Ct} = \{a_{t1}, a_{t2}, \dots, a_{tm}\}$ , элементы которых есть амплитуды информативных частот. В общем случае множество  $A_C$  можно представить как функцию от параметров бурения, описываемых двумя векторами:

$$A_c = f(V, W), \quad (2)$$

где вектор  $V$  объединяет параметры процесса бурения, косвенно влияющие на элементы множества  $A_c$ , но не характеризующие состояние долота (осевая нагрузка на долото, твердость породы); вектор  $W$  – вектор конструктивных элементов долота, величина износа которых проявляется в изменении элементов множества  $A_c$ .

Основная гипотеза, использованная при поиске зависимости между амплитудами информативных частот и степенью износа долота, базировалась на следующих предположениях: функция износа долота монотонна и имеет непрерывно возрастающую компоненту; отклонения технологических параметров бурения не превышают заданных технологических норм; величина признакового расстояния между техническими состояниями долота прямо пропорциональна времени его работы.

При разработке критерия использовались результаты замеров продольных и поперечных колебаний бурильной колонны и колебаний промывочной жидкости. Критерий разрабатывался в следующем порядке. Обозначим техническое состояние нового долота –  $S_1$ , состояние изношенного долота  $S_t$ , где  $t$  соответствует номеру конечной серии замеров при полном износе долота. В качестве примера рассматривается долбление компоновкой: долото 215,9ТЗГНР15, турбобур ЗТСШ-195, интервал бурения от 945 м до 1100 м, при достижении глубины 1100 м принято решение о замене долота. В рассматриваемом примере  $t=10$  соответствует номеру конечной серии замеров при полном износе долота, тогда  $S_{10}$  есть неработоспособное состояние долота, при котором заканчивается долбление.

Дихотомическим методом распознавания образов определялись множества  $G$ ,  $A_{c1}$  и  $A_{c10}$ , разделяющие спектры, полученные при долблении изношенным долотом и новым долотом ( $G$  без индекса, так как при разработке критерия использовано только одно множество  $G_{10}$ , разделяющее состояния долота  $S_1$  и  $S_{10}$ ). Информативные частоты для продольных колебаний бурильной колонны, в Гц - 9, 146, 20, 16, 65, 51, 33, 145, 134, 34; для поперечных колебаний бурильной колонны, в Гц - 148, 76, 73, 74, 79, 143, 77, 149, 154 и 112. Информативные частоты пульсации промывочной жидкости – 9, 4, 24, 6, 22, 13, 44, 121, 5, 2. После этого по этим информативным

частотам множества  $G$  определяются  $A_{C2}...A_{C9}$  для промежуточных состояний долота  $S_2...S_9$ .

Состав информативных частот подтверждает предположение о проявлении в вибрации бурильной колонны процесса изнашивания долота. Причинами выхода из строя рассматриваемого долота было заклинивание шарошек, о чем информируют частоты до 100 Гц, и сильный износ вооружения - частоты свыше 100 Гц. В процессе долбления амплитуды информативных частот продольных колебаний возрастают в 1,8-2,7 раз, поперечных колебаний в 1,5-4,8 раз. Это возрастание коррелировано не с углублением скважины, а непосредственно с износом долота, поскольку относительное увеличение глубины скважины при проходке данным долотом составляет 12%, при этом изменение соответствующих элементов  $A_{C10}$  относительно  $A_{C1}$  составляет от 200 до 400%. Значения амплитуд информативных частот пульсации промывочной жидкости в процессе бурения не изменяются.

Для оценки степени износа долота в качестве критерия можно использовать значения множества  $A_C$ , но оценка может быть неверной, так как изменение

соответствующих элементов  $A_C$  во времени немонотонное (рисунок 8). Поэтому для разработки критерия оценки, а также прогнозирования отказа долота необходимо определить вид функциональной зависимости, которая наилучшим образом бы описывала зависимость

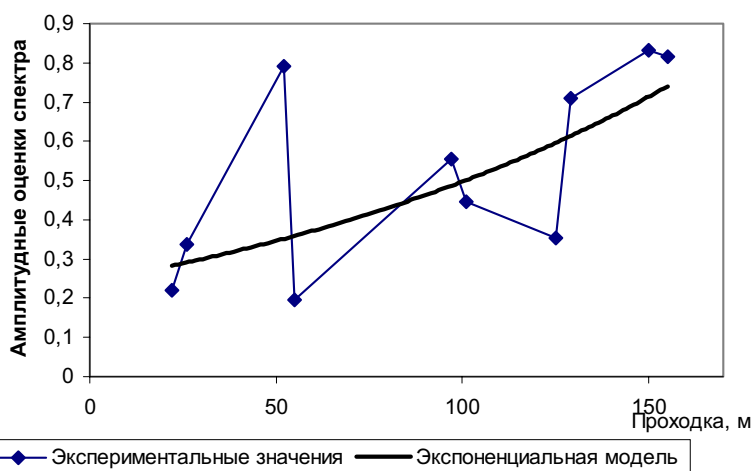


Рисунок 8 – Экспоненциальная зависимость элементов  $A_C$  от наработки долота

амплитуд информативных частот от наработки долота, для чего применялись методы и средства регрессионного анализа. При подборе регрессионной модели независимым фактором или переменной является проходка  $l$ , отражающая наработку долота, откликом или зависимой переменной являются значения множества  $A_C$ . В качестве модели выбрана экспоненциальная модель (см. рисунок 8) в виде

$$F_{tm} = c_{tm} \cdot e^{b_{tm} \cdot l}, \quad (3)$$

где  $F_{tm}$  - значение амплитуды информативной частоты  $m$  согласно модели, построенной после замера  $t$ ;  $l$  – величина проходки;  $c_{tm}$ ,  $b_{tm}$  – оценки коэффициентов регрессионной модели.

Оценки коэффициентов найдены по каждой информативной частоте множества  $G$  для продольных и поперечных колебаний методом наименьших квадратов.

Критерий оценки технического состояния долота имеет вид

$$R_t = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^{10} \frac{F_{tm}}{F_{1m}}, \quad (4)$$

где  $F_{tm}$  - текущее значение;  $F_{1m}$  - начальное значение, соответствующее состоянию нового долота  $S_1$ , определяется по выражению  $F_{1m} = c_{1m} \cdot e^{b_{1m} \cdot l_1}$ .

Все эталонные значения критерия  $R_t$  определяются по формуле (4) при обучении системы распознавания. Обучение производится при бурении первой скважины разбуриваемой площади, а полученные эталонные значения используются для идентичных условий бурения при дальнейшем применении критерия.

Алгоритм оценки состояния долота сводится к периодическому, через приблизительно равные интервалы проходки, измерению уровня вибрации и получению спектра. Затем определяются оценки коэффициентов  $c_{tm}$  и  $b_{tm}$  экспоненциальной зависимости, вычисляется текущее значение  $F_{tm}$ . По формуле (4) находится значение  $R_t$ , которое сравнивается с эталонным, и по нему оценивается состояние долота.

Однако, зная  $R_t$ , ответить на вопрос о том, сколько еще проработает долото до выхода из строя, довольно сложно. Для увеличения информативности полученного критерия необходимо оценить с допустимой вероятностью интервал глубин, где долото будет неработоспособным, то есть спрогнозировать отказ долота.

Среднее значение доверительного интервала отказа долота, определенное при прогнозировании после  $t$ -го замера, назовем критической глубиной  $\bar{l}k_t$ . Значение

критической глубины при прогнозе после замера  $t$  по информативной частоте  $m$  обозначим  $lk_{tm}$ , она определяется из условия (4)

$$lk_{tm} = \frac{\ln \frac{F_{tm}^{np}}{c_{tm}}}{b_{tm}}, \quad (5)$$

где  $F_{tm}^{np}$  - прогнозируемое значение амплитуды согласно модели, определяемое по выражению  $F_{tm}^{np} = R_k \cdot F_{1m}$ ,  $R_k$  – эталонное значение параметра  $R$ , при котором долото считается полностью изношенным ( $Rk$  - это отношение амплитуд спектра изношенного долота и амплитуд спектра нового долота  $R_k = (\sum_{m=1}^{10} a_{tm} / a_{1m}) / k$ ).

Прогнозы по данным продольных и поперечных колебаний считаем независимыми и равнозначными. Получив значения  $lk_{tm}$  по каждой информативной частоте, определяем доверительный интервал (доверительную оценку) критической глубины для случая, когда средняя квадратическая ошибка прогноза заранее не известна. Последовательность оценки технического состояния долота и определение доверительных интервалов отказа долота приводится в алгоритме (рисунок 9).

При разработке критерия использовалось только одно множество информативных частот  $G_{10}$  (выше в тексте  $G$ ). При реальном применении алгоритма множество  $G_t$  определяется каждый раз после замера  $t$ , начиная с  $t=5$ . Оценивается техническое состояние по критерию  $R_t$ . Прогнозирование отказа долота производится в следующем порядке. Производится замер  $t-1$ , определяются множества  $G_{t-1}$ ,  $A_{c1}$  и  $A_{c(t-1)}$ , разделяющие начальное и текущее состояния долота. Вычисляются значения критической глубины  $lk_{t-1,m}$ . Если это первое прогнозирование, то по значениям, которые удовлетворяют условию  $L \min_{t-1} \leq lk_{t-1,m} \leq L \max$ , определяется доверительный интервал отказа долота. Здесь  $L \min_t$  - глубина, при достижении которой происходит замер вибрации  $t$ ,  $L \max$  - максимально возможная проходка диагностируемого долота в данных условиях. После замера  $t$  аналогично определяются множества  $G_t$ ,  $A_{c1}$  и  $A_{ct}$ , вычисляются значения  $lk_{tm}$ , проверяется условие  $L \min_t \leq lk_{tm} \leq L \max$ .

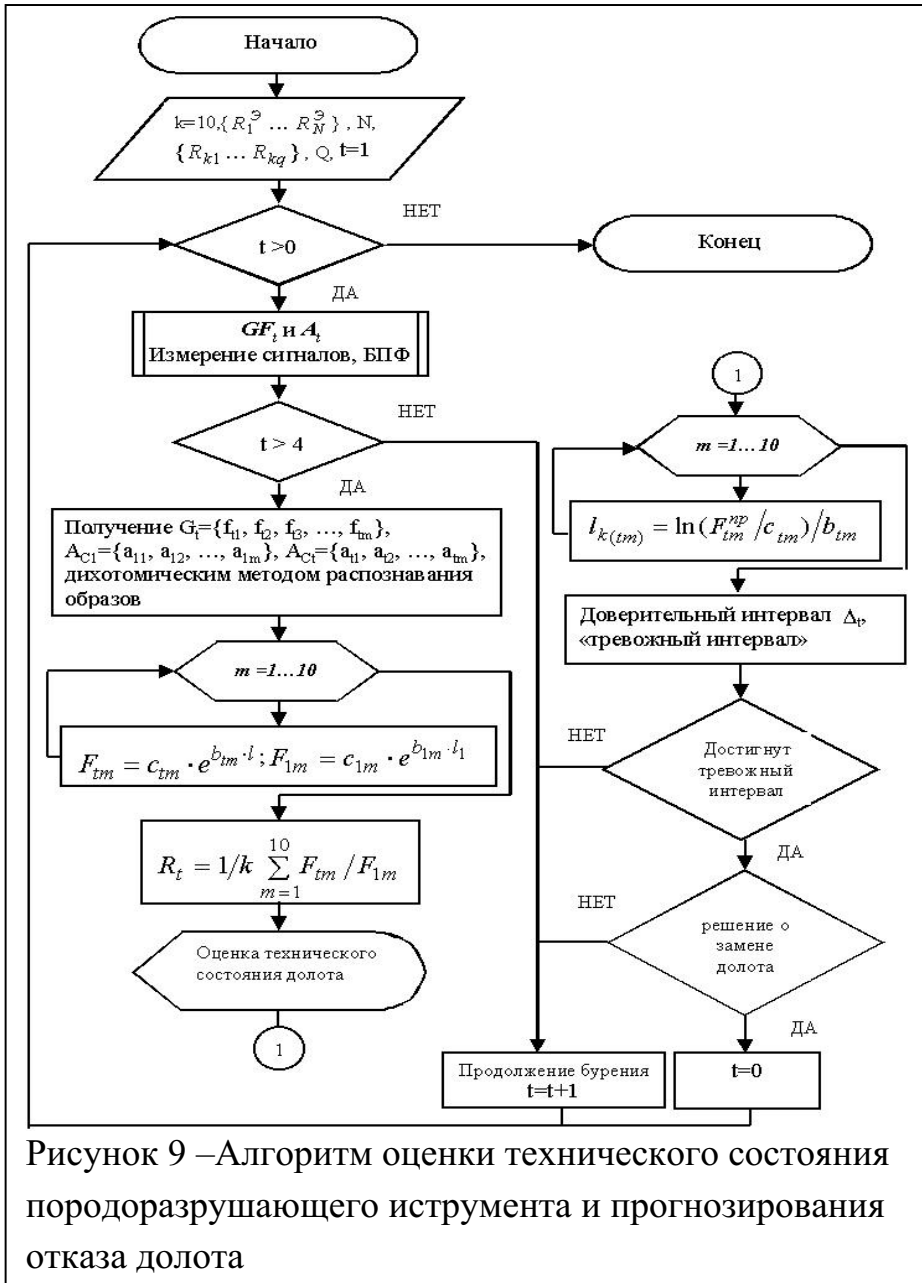


Рисунок 9 – Алгоритм оценки технического состояния породоразрушающего инструмента и прогнозирования отказа долота

Так как вычислялся предыдущий прогноз  $t-1$ , то по спектрам замера  $t-1$ , но для частот множества  $G_t$  определяются  $A'_{c1}$  и  $A'_{ct}$ , затем вычисляются значения  $lk'_{tm}$ .

Удовлетворяющие условию

$$L \min_{t-1} \leq lk'_{tm} \leq L \max,$$

добавляются к значениям  $lk_{t-1m}$ , в результате определяется новый доверительный интервал прогноза  $t-1$ , предыдущий прогноз уточняется. По замеру  $t$ , но для частот множества  $G_{t-1}$

определяются  $lk'_{t-1m}$ .

Удовлетворяющие условию

$$L \min_t \leq lk'_{t-1m} \leq L \max,$$

добавляются к значениям  $lk_{tm}$ , вычисляются доверительные интервалы прогноза  $t$ . Аналогично после замера  $t+1$  уточняются предыдущие доверительные интервалы и строится новый прогноз  $t+1$  по  $G_{t-1}$ ,  $G_t$ ,  $G_{t+1}$ . Таким образом, с каждым следующим прогнозом количество значений критической глубины  $lk_{tm}$ , по которым строится доверительный интервал, увеличивается, в результате интервал сужается, точность прогноза повышается. Область наложения доверительных интервалов образует «тревожный интервал», где с заданной доверительной вероятностью произойдет отказ долота. При достижении в процессе бурения тревожного интервала необходимо внимательно следить за ходом долбления, при появлении косвенных признаков полного износа долота (снижение скорости проходки, повороты ведущей бурильной

трубы в направлении реактивного момента забойного двигателя и др.) необходимо принимать решение о замене долота.

На рисунке 10 отражен процесс прогнозирования при бурении. После замера вибрации на глубине 101 м определяются первые доверительные интервалы (прогноз 1, сектор *А*). При достижении этой глубины долото остается в работоспособном состоянии. Производится замер вибрации на глубине 125 м, предыдущий прогноз 1 уточняется, определяются доверительные интервалы 2-го прогноза (сектор *Б*).

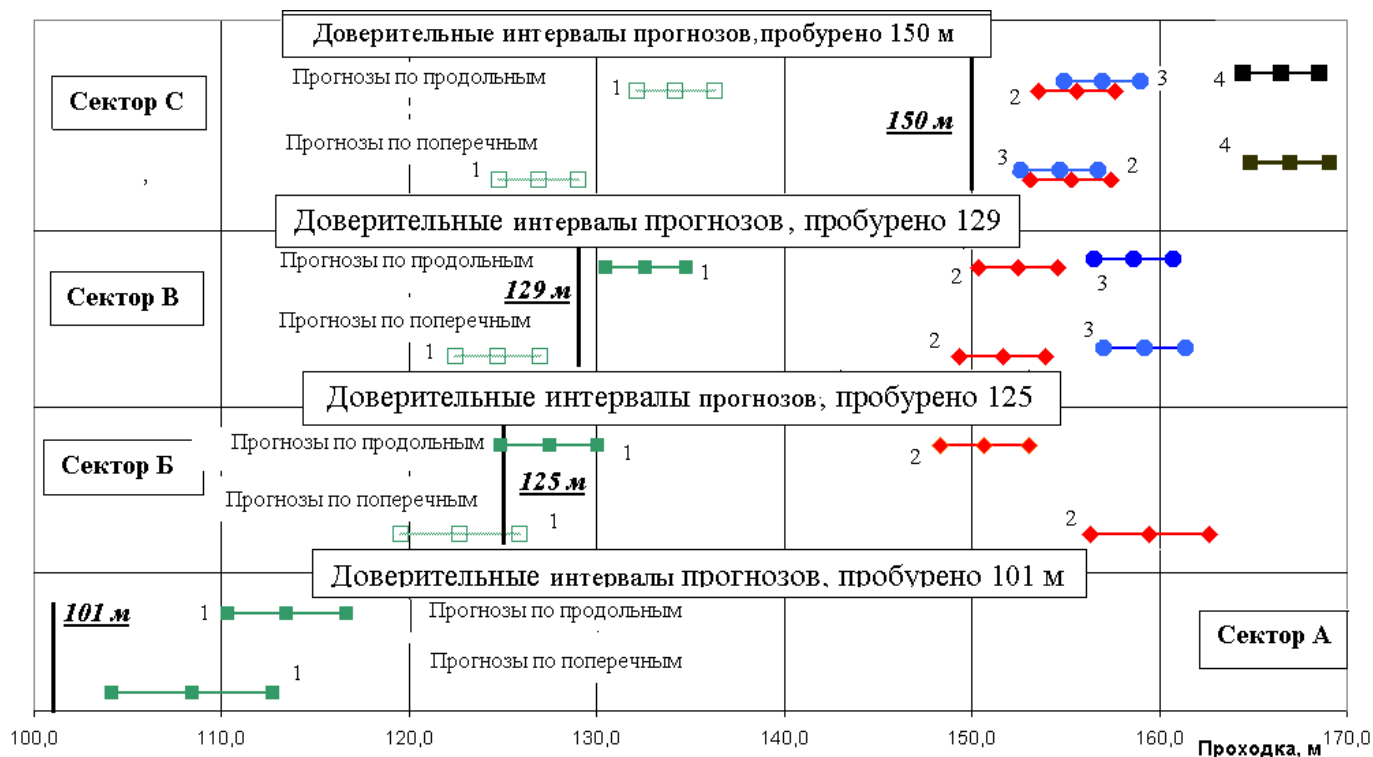


Рисунок 10 - Пример прогнозирования отказа долота

Как видно из рисунка 10, в секторе Б прогноз 1 недействителен, но прогноз 2 определяет возможные интервалы выхода долота строя. Аналогично строятся доверительные интервалы после замера на глубине 129 м (сектор *В*), где прогнозы 2 и 3 сближаются, определяя наиболее вероятный интервал выхода долота из строя (150 – 160 м). Замер вибрации на глубине 150 м доверительных интервалов (сектор *С*) подтверждает предыдущие оценки, отраженные в секторе *В*. Появляется явно выраженный «тревожный интервал» 152-158 м, причем тревожные интервалы по данным поперечных и продольных колебаний совпадают. Отказ испытываемого долота произошел на глубине 155 м от начала долбления, то есть в пределах найденного «тревожного интервала».

По алгоритму проводилось прогнозирование технического состояния других долот, получены удовлетворительные результаты. Для долота III-295,3СЗГВ№54, забойный двигатель 2ТСШ-195, определен «тревожный интервал» от 152 до 158 м, полный износ долота наступил при проходке 154 м.

После отработки долота в базу данных заносятся: тип долота, интервал бурения, порода, компоновка, глубина, на которой произошел отказ долота, количество метров, пройденных долотом, значение *Rk* для отработавшего долота. Эта база данных используется на других скважинах для выбора значения *Rk* и ведения статистики отработки долот на конкретных разбуриваемых площадях.

В результате применения дихотомического метода распознавания образов разработан критерий оценки технического состояния долота и способ прогнозирования отказа долота, что позволило разработать алгоритм и методику оценки технического состояния долота и прогнозирования его отказа в процессе бурения.

### **Основные выводы и результаты**

- 1 Установлено влияние режимных параметров процесса бурения – осевой нагрузки, давления промывочной жидкости на математическое ожидание площади спектра продольных и поперечных колебаний бурильной колонны и эксцесс площади спектра продольных колебаний бурильной колонны, поэтому для оценки технического состояния долота необходим адаптирующийся к условиям бурения метод диагностирования.
- 2 Установлена регрессионная экспоненциальная зависимость между выделенными дихотомическим методом распознавания образов амплитудами спектра продольных и поперечных колебаний бурильной колонны и техническим состоянием долота.
- 3 Разработан критерий оценки технического состояния долота, определяемый как отношение значений регрессионной экспоненциальной модели в процессе бурения к значениям этой модели в начале бурения.
- 4 Разработана методика оценки технического состояния долота и прогнозирования его отказа, позволяющая проводить в процессе бурения периодическую оценку

технического состояния и прогнозирование момента полного износа долота.

Методика апробирована для различных типоразмеров трехшарошечных долот.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

- 1 Галеев А.С., Москвин С.А. Исследование акустического канала связи // Опыт, проблемы и перспективы внедрения методов виброакустического контроля и диагностики машин и агрегатов: Сб. науч. тр. – Октябрьский: ОФ УГНТУ, 2000. – С. 11-38.
- 2 Москвин С.А. Комплекс для измерения технологических параметров бурения // Проблемы нефтедобычи Волго-Уральского региона: Сб. тез. докл. науч.-техн. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – С. 63-65.
- 3 Москвин С.А. К вопросу о необходимости исследования вибрации бурильной колонны // Проблемы нефтедобычи Волго-Уральского региона: Сб. тез. докл. науч.-техн. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – С. 67.
- 4 Галеев А.С., Москвин С.А. Измерительный комплекс для исследования колебаний на буровой установке // Научные проблемы Волго-Уральского нефтегазового региона. Технические и естественные аспекты: Сб. науч. тр.: В 2-х т. Т.1.- Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – С. 94-98.
- 5 Султанов Б.З., Москвин С.А., Филимонов О.В., Каминский С.Г. Диагностирование основных неисправностей электрооборудования агрегатов, применяемых на буровой установке // Научные проблемы Волго-Уральского нефтегазового региона. Технические и естественные аспекты: Сб. науч. тр.: В 2-х т. Т.2.- Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – С. 82-88.
- 6 Москвин С.А. Исследование колебаний бурильной колонны на промысле // Научные проблемы Волго-Уральского нефтегазового региона. Технические и естественные аспекты: Сб. науч. тр.: В 2-х т. Т.1.- Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – С. 102-107.
- 7 Москвин С.А., Галеев А.С. Предварительные результаты оценки состояния долота по продольным колебаниям бурильной колонны // Современные технологии в машиностроении – 2003: Сб. ст. VI Всерос. науч.-практ. конф. - Пенза, 2003. – С. 325-327.

- 8 Москвин С.А., Галеев А.С. Оценка состояния долота по коэффициенту эксцесса продольных колебаний // АлНИ – 2002: Материалы науч.-техн. конф. – Альметьевск, 2003. – С. 30-31.
- 9 Аралбаев Т.З., Москвин С.А. К вопросу оценки и прогнозирования технического состояния долота буровой установки с использованием дихотомического метода распознавания образов // Современные информационные технологии – 2003: Сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2003. – С.78-83.
- 10 Султанов Б.З., Москвин С.А. Критерий оценки технического состояния долота по колебаниям бурильной колонны // Реализации государственных образовательных стандартов при подготовке инженеров механиков: проблемы и перспективы: Материалы II Всерос. учеб.-науч.-метод. конф. – Уфа, 2003. – С.221-228.
- 11 Султанов Б.З., Москвин С.А. Применение критерия оценки технического состояния долота по колебаниям бурильной колонны для прогнозирования его неработоспособного состояния // Реализации государственных образовательных стандартов при подготовке инженеров механиков: проблемы и перспективы: Материалы II Всерос. учеб.-науч.-метод. конф. – Уфа, 2003. – С. 216-221.