

На правах рукописи

Кутузов Павел Андреевич



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ ПРИ УГЛУБЛЕНИИ
НАКЛОННО НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИН**

*Специальность 2.8.2. Технология бурения и освоения
скважин*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Двойников Михаил Владимирович

Официальные оппоненты:

Хузина Лилия Булатовна

доктор технических наук, профессор, государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, заведующий кафедрой;

Лягов Илья Александрович

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Перфобур», генеральный директор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

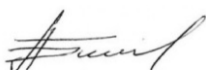
Защита диссертации состоится **15 июля 2026 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.10 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 15 мая 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



БЛИНОВ

Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Освоение труднодоступных территорий, в том числе Арктики и шельфовых месторождений, предусматривает строительство протяженных наклонно направленных скважин (ННС). В связи с этим повышаются требования, предъявляемые к автоматизации контроля и управления параметрами бурения скважин. Буровые установки (БУ), оборудованные автоматизированными системами управления (АСУ), выполняют мониторинг эксплуатационных характеристик наземных и глубинных машин и механизмов. Например, при углублении вертикальных скважин за счет определения веса бурильной колонны (БК) на крюке буровой установки и разгруженной части ее веса, составляющей нагрузку на долото, а также нулевого сечения (условное отсутствие напряжений, действующих на БК) по результатам интерпретации наземных и забойных датчиков телеметрических систем компоновки низа бурильной колонны (КНБК) возможно осуществлять с высокой точностью прогноз напряженно-деформированного состояния (НДС). Однако в процессе бурения наклонно направленных участков роторным способом или с применением гидравлических забойных двигателей, а также проработки ствола сложно построенных профилей остается открытым вопрос возможности оперативного контроля и управления НДС бурильной колонны для обеспечения энергоэффективности углубления скважины.

Таким образом, актуальность работы обусловлена созданием технологии мониторинга и прогнозирования пространственного положения динамически активных участков бурильной колонны.

Степень разработанности темы исследования

Проблемами оценки, моделирования и прогнозирования НДС динамически активной БК занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Балденко Д.Ф., Балицкий П.В., Габдрахимов М.С., Григулецкий В.Г., Двойников М.В., Саркисов Г.М., Сароян А.Е., Султанов Б.З., Хегай В.К., Хузина Л.Б., Юнин Е.К., Aadnoy B.S., Dawson R., Johancsik C.A., Juvkam-Wold H.C., Lubinski A., Menand S., Miska S., Mitchell R.F., Paslay P.R., Qiu W., Wu J. и другие.

Разработанные учеными аналитические модели сил, моментов и динамики бурильного инструмента требуют уточнения, что

обусловлено ограниченностью достоверных данных о реальных условиях в стволе скважины и допущениями, заложенными в постановку физико-математической задачи. Методы конечных элементов, уточняющие поведение бурильной колонны, также зависят от качества и полноты исходных данных, а их применение требует значительных вычислительных ресурсов и времени. Разработанные типы забойных датчиков осевой нагрузки, момента, частоты вращения, таких как электромагнитные, трибоэлектрические, пьезоэлектрические не позволяют решить проблему полностью, не существует распределенных датчиков усилий и деформаций, устанавливаемых по длине бурильной колонны с замковыми соединениями, или решения остаются экономически нецелесообразными.

Объект исследования – контроль и управление пространственной формой бурильной колонны при углублении наклонно направленных скважин.

Предмет исследования – процесс динамического распределения сил и моментов, влияющих на изменение пространственной формы БК при ее поступательном движении.

Цель работы – обеспечение энергоэффективности углубления наклонно направленных скважин усовершенствованием методов контроля и управления пространственной формой бурильной колонны в условиях геолого-технологической неопределенности.

Идея работы заключается в применении технологии контроля и прогнозирования НДС БК, основанной на использовании совокупности экспериментально установленных критериев и аналитических зависимостей, обеспечивающей оперативное определение пространственного положения бурильной колонны в процессе углубления наклонно направленных скважин.

Задачи исследования:

1. Анализ эффективности потенциальных компонентов системы мониторинга НДС БК.
2. Совершенствование аналитической модели за счет оценки влияния колебаний и других факторов на НДС и устойчивость колонны.

3. Анализ косвенных факторов для детектирования инцидентов, связанных с деформацией бурильной колонны для повышения точности аналитических систем.

4. Разработка методических рекомендаций по предупреждению потери устойчивости бурильной колонны в соответствии с предлагаемой системой мониторинга НДС БК.

Научная новизна работы:

1. Уточнен принцип работы динамически активной части бурильной колонны, позволяющий определить критическое напряженно-деформированное ее состояние и пространственную форму за счет поинтервального контроля сил трения и учета наличия замков.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность идентификации и локализации потери устойчивости бурильной колонны по скорости ее деформации.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин по пунктам:

4. Буровой инструмент. Конструкция и оптимизация породоразрушающего инструмента. Конструкции, характеристики и технология применения забойных двигателей. Технология и технические средства для бурения с отбором керна. Конструкция и технология применения внутрискважинных технических средств, используемых при строительстве скважин.

5. Осложнения и предупреждение осложнений при строительстве скважин. Прогнозирование аварийных инцидентов с буровым инструментом, факторов, влияющих на риски при строительстве скважин. Технологии и технические средства для ликвидации осложнений и аварий в скважине. Методы и технологии обеспечения устойчивости ствола скважины.

10. Моделирование, автоматизация и роботизация процессов бурения и освоения скважин, включая ремонтно-восстановительные работы, предупреждение и ликвидацию осложнений.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность обеспечения энергоэффективности бурения

наклонно направленных скважин применением технологии мониторинга и прогнозирования НДС БК, включающей алгоритм определения распределения сил трения и критических нагрузок динамической потери устойчивости.

2. Разработаны схемы реализации систем мониторинга в зависимости от расположения датчиков, полноты и достоверности используемых данных о скважинных условиях работы компоновки и технологических параметров бурения.

3. Разработан алгоритм идентификации и локализации потери устойчивости бурильной колонны, используемый в системах мониторинга, основанных на работе аналитических моделей.

4. Разработаны методические рекомендации по обеспечению сохранения устойчивого состояния деформированного инструмента в целях предупреждения его повышенного механического и усталостного износа, обеспечения энергоэффективности бурения.

5. Результаты диссертационной работы внедрены в производственную деятельность ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» (акт внедрения от 24.03.2026 №1).

Методология и методы исследования

Проведение исследований осуществлялось в соответствии с системным подходом, математическим и имитационным моделированием процессов и включало: анализ методов повышения точности построения эпюр сил и моментов по бурильной колонне и существующих датчиков и каналов связи для реализации системы мониторинга НДС БК; теоретические исследования прочностных характеристик оптоволоконного кабеля в скважинных условиях, гидравлических потерь от наличия кабеля в компоновке, затухания сигнала по оптоволоконному кабелю; разработку методики и лабораторной установки для физического моделирования потери устойчивости в динамических условиях; численное моделирование методом конечных элементов и физическое моделирование влияния разночастотных и разноамплитудных колебаний на устойчивость бурильной колонны. Обработка результатов экспериментальных исследований включала статистический анализ, графическую интерпретацию и сравнение экспериментальных данных с расчетными моделями.

Положения, выносимые на защиту:

1. Контроль и управление распределением сил трения и амплитудно-частотным диапазоном ориентированной динамики буровой колонны с учетом замков позволяет сохранять устойчивое ее состояние, обеспечивающее энергоэффективный процесс бурения.

2. Разработанный алгоритм идентификации и локализации потери устойчивости буровой колонны, включающий измерение скорости движения талевого блока и веса на крюке, позволяет осуществлять контроль и прогнозирование напряженно-деформированного состояния в режиме реального времени наклонно направленного бурения.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена применением апробированных методов теоретического и численного анализа, физического моделирования на лабораторной установке с соблюдением критериев подобия, использованием современного измерительного оборудования, повторяемостью экспериментов и сопоставимостью экспериментальных данных, апробацией полученных результатов исследования на конференциях всероссийского и международного уровня.

Апробация результатов диссертации проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных; за последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных:

1. XIV специализированная выставка-форум «Нефтедобыча. Нефтепереработка. Химия» (16-18 ноября 2022, г. Самара);

2. III Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (20-24 мая 2024, г. Санкт-Петербург);

3. Всероссийская научно-практическая нефтегазовая конференция «Молодой взгляд на проблемы ТЭК» (16-17 октября 2025, г. Тюмень);

4. Международная научно-практическая конференция имени Д.И. Менделеева (20-22 ноября 2025, г. Тюмень);

5. XIV Международная конференция «Наука без границ» (1-6 декабря 2025, г. Тобольск).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; разработке лабораторной установки для исследования потери устойчивости в динамических условиях; разработке методики проведения физических и численных экспериментов; проведении физических и численных экспериментов, обработке и интерпретации результатов экспериментов; разработке схем реализации систем мониторинга НДС БК; разработке алгоритма идентификации и локализации потери устойчивости буровой колонны; разработке комплекса мер по недопущению формирования продольных изгибов буровой колонны.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 175 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 87 рисунков и 45 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.т.н., профессору Двойникову Михаилу Владимировичу, а также к.т.н., доценту Буслаеву Георгию Викторовичу и к.т.н. Кузнецовой Наталье Юрьевне за ценные советы и наставления в научной деятельности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ основных факторов неопределенности при построении модели напряженно-деформированного состояния бурильной колонны в процессе углубления наклонно направленной скважины. Рассмотрены научные достижения в разработке моделей бурильной колонны, таких как гибкая, жесткая и гибридная модель, в том числе моделей критического и закритического ее состояния, являющихся неотъемлемой частью математического прогнозирования напряженно-деформированного состояния в скважине. Отдельное внимание уделено проблеме повышения точности оценки НДС БК в режиме реального времени бурения, в том числе за счет возможности использования внутрискважинных датчиков и каналов связи для осуществления прямых измерений напряжений и деформаций внутрискважинного инструмента.

Во второй главе предложен и теоретически обоснован способ обработки инклинометрии извилистых участков ствола скважины для эффективного использования модели гибкой колонны в системе мониторинга НДС БК. Представлено математическое описание напряженно-деформированного состояния модели гибридной колонны. Предложена методика теоретического обоснования возможности реализации оптоволоконной телеметрии в системе мониторинга НДС БК, основанной на прямых измерениях. Сформулированы гипотезы о механизмах влияния динамических условий на поведение бурильной колонны, включая её критическое и закритическое состояние. Сформулирована математическая задача, приведены и обоснованы исходные данные, используемые для проведения численного моделирования с применением метода конечных элементов. Разработана лабораторная установка и методика лабораторных экспериментов, предназначенные для исследования потери устойчивости в динамических условиях.

В третьей главе представлены теоретические расчеты прочности оптоволоконного кабеля, датчика деформаций, гидравлических потерь при его расположении в бурильной колонне, затухания сигнала. Представлены результаты проведенных численных и лабораторных экспериментов исследования влияния динамических условий на потерю устойчивости бурильной колонны. Выявлены и доказаны механизмы влияния колебаний на устойчивость бурильной колонны. Предложена стратегия определения диапазона частот и амплитуд переменного воздействия в целях стабилизации инструмента и достижения энергоэффективности за счет аккумуляирования энергии в системе бурильный инструмент – забой скважины, в том числе за счет применения забойных вибраторов. Выделены основные закономерности поведения бурильной колонны в широком спектре частот, амплитуд и видов колебаний, что позволяет определить способ идентификации и локализации потери устойчивости за счет отслеживания изменения скорости движения тальблока и веса на крюке.

В четвертой главе изложены результаты разработки технологии мониторинга НДС БК при углублении наклонно направленных скважин. Показано, что в зависимости от расположения внутрискважинных и наземных датчиков выделяются четыре типа систем мониторинга и их подтипы. Рассмотрены схемы реализации систем, основанных на прямых измерениях с применением оптоволоконного кабеля, а также описаны системы, функционирующие на основе аналитических моделей. Для последних разработан алгоритм идентификации и локализации потери устойчивости по параметрам изменения скорости движения тальблока и веса на крюке. Разработаны методические рекомендации по предотвращению потери устойчивости бурильной колонны при бурении наклонно направленных скважин.

В заключении отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Контроль и управление распределением сил трения и амплитудно-частотным диапазоном ориентированной динамики

бурильной колонны с учетом замков позволяет сохранять устойчивое ее состояние, обеспечивающее энергоэффективный процесс бурения.

При анализе существующих подходов к моделированию НДС БК в процессе углубления наклонно направленных скважин выявлено, что в используемых системах мониторинга возникают затруднения при идентификации потери устойчивости и описании закритического состояния колонны, что обусловлено неопределенностью внутрискважинных условий и допущениями математических моделей прогнозирования и детектирования критического и закритического состояния. К числу допущений относится статическая постановка задачи, не учитывающая динамические условия в процессе бурения. В целях уточнения влияния динамических условий на устойчивость бурильной колонны разработаны методики проведения численных и физических экспериментов. При проведении численных экспериментов используется метод конечных элементов в программном комплексе Abaqus. Рассматривается 12 метровая стальная бурильная труба с наружным диаметром 88,9 мм, толщиной стенки 9,35 мм, замком с наружным диаметром 127 мм (рисунок 1). Один конец трубы моделируется как жесткая заделка, противоположный конец движется только в осевом направлении OZ. Порядок приложения нагрузок учитывает гравитацию за счет приложения ускорения $-9,81 \text{ м/с}^2$ вдоль оси Y в течение первой секунды, которое сохраняется до конца эксперимента. Начиная с 1 секунды, на торец трубы прикладывается осевая нагрузка, которая линейно увеличивается до 500 кН в течение 30 секунд. Проводятся серии экспериментов с осевыми колебаниями вдоль оси OZ, с боковыми колебаниями вдоль оси OX, с боковыми колебаниями вдоль оси OY, каждая серия выполняется с учетом трения БК о стенки скважины и без него. Боковые колебания моделируются с помощью гармонически изменяющегося ускорения с амплитудами 0,5g, 1g и 1,5g при частотах 1, 5, 10, 15, 30 и 35 Гц, осевые - с помощью гармонически изменяющейся осевой силы 15, 50 и 80 кН при тех же частотах. В сценариях с трением используется коэффициент трения 0,3.

Для осуществления физического моделирования была разработана лабораторная установка (рисунок 2).

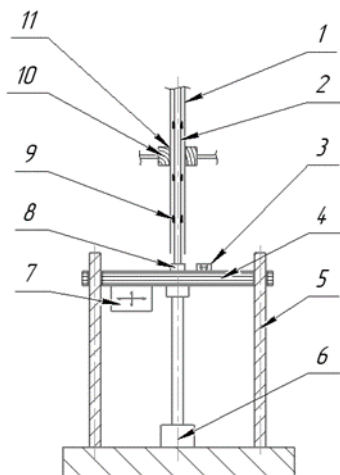


Рисунок 2 – Лабораторная установка для исследования потери устойчивости БК в динамических условиях

1 – ствол скважины (оргстекло), 2 – модель БК (латунная, алюминиевая, стальная трубка или пруток), 3 – акселерометр-инклинометр, 4 – платформа, 5 – направляющие, 6 – линейный привод, 7 – вибромотор, 8 – тензодатчик, 9 – замки (резиновые кольца), 10, 11 – ребра жесткости с прокладкой

Методика проведения лабораторных экспериментов:

1. Стержень при выключенном вибромоторе, то есть в статических условиях, нагружается вплоть до спирального изгиба с несколькими «полуволнами» (поворот спирали на 180°).

2. При выдвигании штока на требуемую длину осуществляется разгрузка со снятием упругих деформаций изгиба.

3. Во время цикла нагружения – разгрузки производится замер веса тензодатчиком и строится зависимость веса на тензодатчике $F_{ос}$ от хода линейного привода $\Delta l_{ход}$ или от времени проведения эксперимента, производится несколько опытов нагружения-разгрузки для повышения точности проведения эксперимента.

4. Производится повторная серия циклов нагрузки – разгрузки стержня при включенном вибромоторе с постоянным виброускорением и частотой вращения эксцентриков вибромотора с замером виброускорения по акселерометру и веса на тензодатчике.

5. Производится несколько циклов нагрузки – разгрузки при разной частоте вращения вибромотора.

6. Сравниваются графики зависимости $F_{oc} \sim \Delta l_{ход}$ при разных значениях виброускорения и частоты колебаний.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют, что силами трения нельзя пренебрегать при прогнозировании критических нагрузок (рисунок 3). Трение бурильной колонны о стенки скважины в основном оказывает стабилизирующий эффект, влияя на величину критической нагрузки. Наличие замковых соединений, утолщений бурильной трубы, может оказывать стабилизирующий эффект в связи с формированием дополнительной силы прижатия от прогиба колонны от силы тяжести и формирования в теле инструмента напряжений изгиба. Боковые колебания в плоскости XOZ снижают критическую нагрузку за счет формирования эксцентриситета, облегчающего вывод колонны из состояния равновесия. Рост амплитуды колебаний в основном приводит к снижению критической нагрузки. Боковые колебания в плоскости YOZ могут нивелировать стабилизирующий эффект прогиба колонны от наличия замков при амплитуде воздействия $>1g$. Рост амплитуды осевых колебаний в связи с увеличением мгновенной осевой силы в основном приводят к снижению критической нагрузки. Разные сочетания частоты колебаний и амплитуды воздействующей силы формируют зоны стабильности и неустойчивости. В зонах неустойчивости критическая нагрузка существенно снижается, в зонах стабильности снижение критической нагрузки относительно невелико или наблюдается рост критической нагрузки в сравнении со значением, прогнозируемым в статической постановке задачи. Это объясняется явлением параметрического резонанса и решением уравнения Матье (1):

$$\frac{d^2u}{dz^2} + (\alpha - \beta \cos z)u = 0, \quad (1)$$

где α, β – параметры системы, зависящие от частоты колебаний, величины прикладываемых нагрузок, геометрии и свойств материала бурильной колонны; z – независимая переменная, определяемая в рассматриваемой задаче, как $2\pi ft$; f – частота колебаний; t – время; в качестве функции u рассматривается нагрузка на бурильную ко-

лонну. Гармонически изменяющиеся осевая нагрузка и боковое ускорение из-за наличия нелинейностей и изменения внутренних параметров системы формируют локальные амплитудно-частотные зоны, стабилизирующие или дестабилизирующие бурильную колонну.

Отличие среднеарифметического значения производной изменения усилия по времени циклов нагружения-разгружения латунного прутка с наружным диаметром 4 мм и длиной 1 метр в ограничивающей изгиб трубке из оргстекла с внутренним диаметром 12 мм в составе лабораторной установки при воздействии вибрации и без вибрации достигает 10,4% (рисунок 4). Установлено, что колебания влияют на закритическое состояние в связи с повышением эффективности передачи осевой нагрузки за счет снижения эффекта трения БК о стенки скважины из-за возникновения компоненты боковой скорости при колебаниях (2):

$$F_{\text{тр}} = k_c F_{\text{бок}} \frac{v_{\text{ос}}}{\sqrt{v_{\text{ос}}^2 + A^2 \omega^2 \cos^2(\omega t)}}, \quad (2)$$

где k_c – коэффициент сопротивления движению, безразмерный; $F_{\text{бок}}$ – боковая сила, Н; $v_{\text{ос}}$ – скорость осевого движения колонны, м/с; A – амплитуда колебаний, м; ω – циклическая частота колебаний, рад/с; t – время, с.

Эффект выражения (2) должен быть учтен в аналитической модели трения соответствующей системы мониторинга. Механизмы влияния колебаний на устойчивость бурильной колонны свидетельствуют о сложной прогнозируемости явления потери устойчивости, также позволяют скорректировать технологию бурения с точки зрения поиска стабилизирующих амплитудно-частотных зон, аккумулирующих энергию в системе БК-забой скважины.

2. Разработанный алгоритм идентификации и локализации потери устойчивости бурильной колонны, включающий измерение скорости движения талевого блока и веса на крюке, позволяет осуществлять контроль и прогнозирование напряженно-деформированного состояния в режиме реального времени наклонно направленного бурения.

При анализе результатов проведенных экспериментов выявлены закономерности поведения бурильной колонны в закритическом состоянии (рисунок 5, формула 3):

$$\frac{dl_2}{dF_{oc}} \gg \frac{dl_3}{dF_{oc}} > \frac{dl_1}{dF_{oc}}, \quad (3)$$

скорость деформации колонны, производная деформации l по осевой нагрузке F_{oc} , в состоянии синусоидального изгиба (участок II, рисунок 5) больше скорости деформации в состоянии спирального изгиба (участок III, рисунок 5), который больше скорости деформации колонны, подчиняющейся закону Гука при сохранении «прямолинейной» формы устойчивости (участок I, рисунок 5).

Угол наклона линии на участке синусоидального изгиба зависит от значений критических нагрузок синусоидальной и спиральной потери устойчивости, определяемых в фактических скважинных условиях. Угол наклона линии на участке спирального изгиба, в том числе в динамических условиях, согласуется с формулой (4):

$$\Delta l = \frac{F_{oc}L}{ES_{сеч}} + \frac{F_{oc}r_3^2L}{4EI}, \quad (4)$$

где L – длина рассматриваемого участка бурильной колонны, м; E – модуль упругости материала бурильной колонны, Па; r_3 – радиальный зазор между бурильной колонной и стенкой скважины, м; I – осевой момент инерции бурильной колонны, м⁴.

При анализе результатов численных и лабораторных экспериментов обнаружено, что в состоянии синусоидального изгиба наблюдается высокая амплитуда колебаний и выраженная динамика, при дальнейшем переходе в спиральную форму боковые колебания гасятся (рисунки 6-7).

Выражения 3-4 и выявленные особенности динамики развития продольного изгиба используются в алгоритме идентификации и локализации потери устойчивости.

Разработан алгоритм детектирования потери устойчивости бурильной колонны и определения места формирования продольного изгиба:

1. Осуществляется обработка данных инклинометрии по предложенному в диссертационной работе алгоритму.

2. Калибруется коэффициент сопротивления в процессе спуска колонны до забоя скважины.

3. При достижении забоя скважины движение тальблока будет вызвано сжатием колонны и выработкой забоя скважины от осуществления бурения. До потери устойчивости снижение веса на крюке от момента достижения забоя скважины будет приблизительно соответствовать фактической осевой нагрузке на породоразрушающем инструменте.

4. Строя распределение осевой силы по инструменту, также осуществляется расчет осевой деформации по колонне. Если фактическая скорость движения тальблока отличается от ожидаемой, являющейся суммой сжатия колонны по закону Гука и объема разрушения горной породы, согласно реализуемого закона изменения веса на крюке на РПД, то это свидетельствует, что сформировался продольный изгиб при условии неизменности коэффициента сопротивления и отсутствии риска вскрытия нового пласта и пропластка. Ускорение или замедление скорости тальблока при развитии продольного изгиба зависит от отсутствия или наличия сил трения в осевом направлении соответственно.

5. При фиксации отклонения скорости движения тальблока определяется наиболее вероятное место потери устойчивости по известным формулам критической нагрузки синусоидальной и спиральной потери устойчивости с учетом избыточного давления, действующего на стенки бурильной колонны. Критерий вероятности возникновения потери устойчивости определяется как отношение рассчитанного значения осевой силы в каждой точке согласно расчетному шагу к критической нагрузке синусоидального и спирального изгиба в этих же точках.

5.1. Верифицируется критическая нагрузка, протяженность участка с синусоидальным изгибом и определяется угол наклона графика деформации от сжимающей нагрузки. Точка пересечения графика деформации в синусоидальной конфигурации с графиком деформации в спиральной конфигурации позволяет спрогнозировать критическую нагрузку спирального изгиба.

5.2. Резкий скачок деформации может свидетельствовать о преждевременном переходе в состояние спирального изгиба.

5.3. Верифицированным значениям критических нагрузок будут соответствовать вес на крюке и осевая нагрузка на долоте, если

при последующем нагружении вес на крюке (ВСП) будет меньше соответствующего определенной критической нагрузки, то произойдет потеря устойчивости БК.

Для повышения качества детектирования и локализации потери устойчивости рекомендуется установка датчиков вибрации, давления, осевой нагрузки и момента на долоте. Датчик вибрации за счет определения времени прохождения волны от эпицентра участка перехода в изогнутую конфигурацию позволит повысить точность определения местоположения продольного изгиба в бурильной колонне. Датчик нагрузки на долоте может также выступать в роли индикатора потери устойчивости за счет недоходжения осевой нагрузки сравнительно с разгрузкой на крюке и инструментом косвенной локализации потери устойчивости за счет определения участков с дополнительным прижатием от потери устойчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации приведено решение актуальной задачи - обеспечение энергоэффективности углубления наклонно направленных скважин усовершенствованием методов контроля и управления пространственной формой бурильной колонны в условиях геолого-технологической неопределенности.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Выполнен анализ существующих средств и аналитических моделей, позволяющих осуществлять оценку и прогнозирование напряженно-деформированного состояния бурильной колонны. Предложены четыре типа систем мониторинга НДС БК в зависимости от наличия датчиков и их расположения в бурильной колонне, сложности и адаптивности математических моделей.

2. По результатам проведенных численных и лабораторных экспериментов уточнен принцип влияния колебаний на потерю устойчивости бурильной колонны, позволяющий усовершенствовать аналитическую модель НДС. В основе принципа заложены анализ и оценка факторов, включающих снижение сил трения бурильной колонны о стенки скважины, нивелирование стабилизирующего эффекта гравитации от прогибов при наличии утолщений бурильной колонны или ее нахождения на уступах локального участка ствола

скважины, боковой прогиб колонны от поперечных колебаний в плоскости, перпендикулярной вертикальной, изменение мгновенной осевой силы от осевых колебаний, а также стабилизирующий и дестабилизирующий эффекты явления параметрического резонанса.

Наличие амплитудно-частотных зон стабильности и неустойчивости из-за явления параметрического резонанса свидетельствуют о сложной прогнозируемости явления потери устойчивости в реальных скважинных условиях при использовании систем мониторинга, основанных на работе аналитической модели с отсутствием средств для прямых измерений. При работе с динамически активной бурильной колонной рекомендуется поддержание технологических параметров для работы в амплитудно-частотной зоне, стабилизирующей бурильную колонну в целях аккумуляции энергии в системе бурильная колонна – разбуриваемый забой.

3. На основе проведенных экспериментов выявлены закономерности деформации колонны в критическом и закритическом состоянии. Предлагается использовать отличие в скорости деформации колонны при осевой с траекторией скважины формы, синусоидальной и спиральной конфигурации в качестве критерия идентификации потери устойчивости. Выявлено, что колонна в состоянии синусоидального изгиба под воздействием боковых колебаний испытывает высокоамплитудные деформации, при дальнейшем переходе в спиральную форму наблюдается их гашение. Рекомендуется избегать нахождения колонны в синусоидальной и спиральной конфигурации для повышения ресурса внутрискважинного инструмента и оборудования.

4. Разработан алгоритм идентификации и локализации потери устойчивости бурильной колонны с математическим описанием напряженно-деформированного состояния внутрискважинного инструмента. Алгоритм предоставляет возможность определения фактических критических нагрузок потери устойчивости бурильной колонны в скважинных условиях. Разработанные рекомендации позволяют контролировать пространственную форму бурильной колонны, что обеспечивает энергоэффективность углубления наклонно направленных скважин.

Перспективами дальнейшего развития темы диссертации следует считать исследование влияния крутильных колебаний и эффектов вращения колонны и их сложных сочетаний с осевыми и поперечными колебаниями на НДС БК в наклонно направленных скважинах, в том числе с учетом явления параметрического резонанса и демпфирования буровым раствором, в целях преднамеренной стабилизации внутрискважинного инструмента.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Оперативный контроль технологии бурения. Оптическое волокно как новый инструмент измерений и связи для условий бурения наклонно направленных скважин / **П.А. Кутузов**, М.В. Двойников, А.А. Мелехин [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2023. – № 5(365). – С. 11-19. – DOI 10.33285/0130-3872-2023-5(365)-11-19. – EDN PNZIDH

2. Двойников, М.В. Разработка методики исследования потери прямолинейной формы устойчивости бурильной колонны в динамических условиях / М.В. Двойников, **П.А. Кутузов** // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2024. – № 8(152). – С. 68-74. – EDN QSMRJF

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Dvoynikov, M. V. Analysis of Efficiency of Communication Channels for Monitoring and Operational Control of Oil and Gas Wells Drilling Process / M. V. Dvoynikov, **P. A. Kutuzov** // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2025. - Vol. 38, No. 1. – P. 120-131. DOI: 10.5829/ije.2025.38.01a.12.

4. Dvoynikov, M. V. Identification of critical and post-critical states of a drill string under dynamic conditions during the deepening of directional wells / M. V. Dvoynikov, **P. A. Kutuzov** // Eng. – 2025. – Vol. 6, Issue 11. – p. 306. DOI: 10.3390/eng6110306

Публикации в прочих изданиях:

5. Неопределенности процесса бурения наклонно направленных скважин на примере потери устойчивости бурильной колонны / **П.А. Кутузов**, М.В. Двойников // Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья : Тезисы докладов III

Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–24 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2024. – С. 36-37.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Патент № 2850145 Российская Федерация, СПК E21B 47/007 (2025.08); G01N 3/08 (2025.08). Лабораторная установка для исследования продольного изгиба бурильной колонны в динамических условиях. Заявка №2025107717: заявл. 17.12.2024: опубл. 05.11.2025 / **П.А. Кутузов**, М.В. Двойников; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 10 с.: ил.

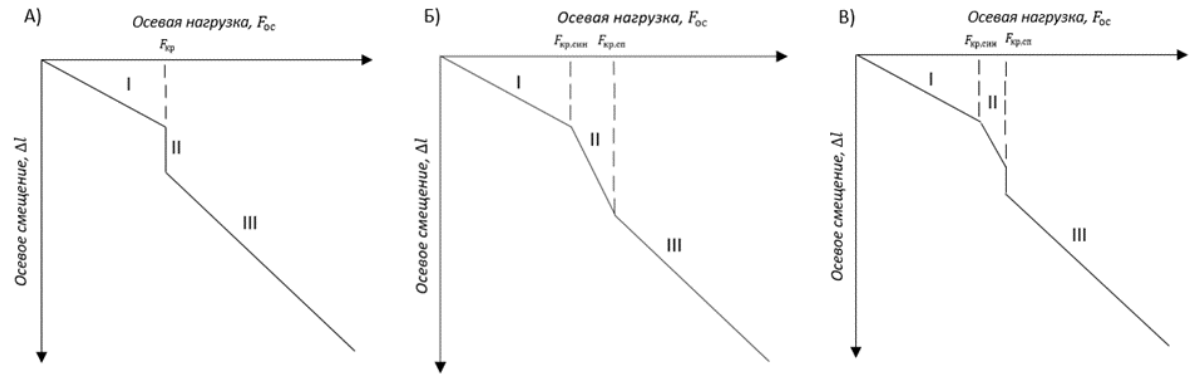
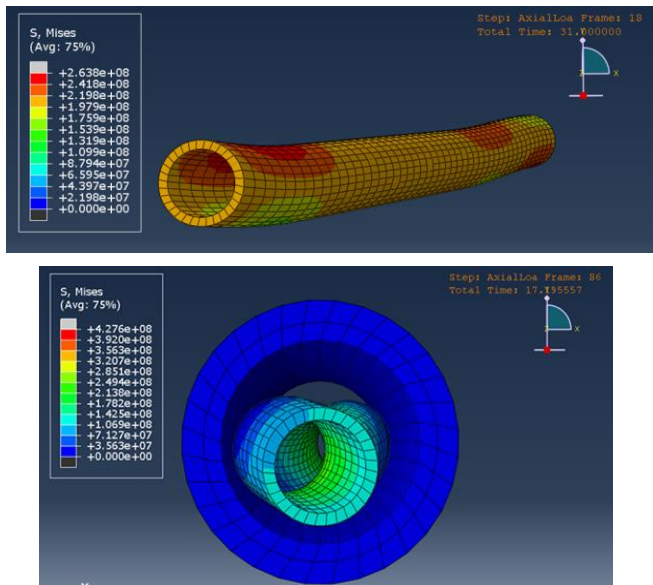


Рисунок 5 – Обобщенные схемы деформации колонны в процессе сжатия

Рисунок 1 – напряженно-деформированное состояние буровой колонны, сохраняющей прямолинейную форму устойчивости (сверху) и потерявшей устойчивость (снизу)

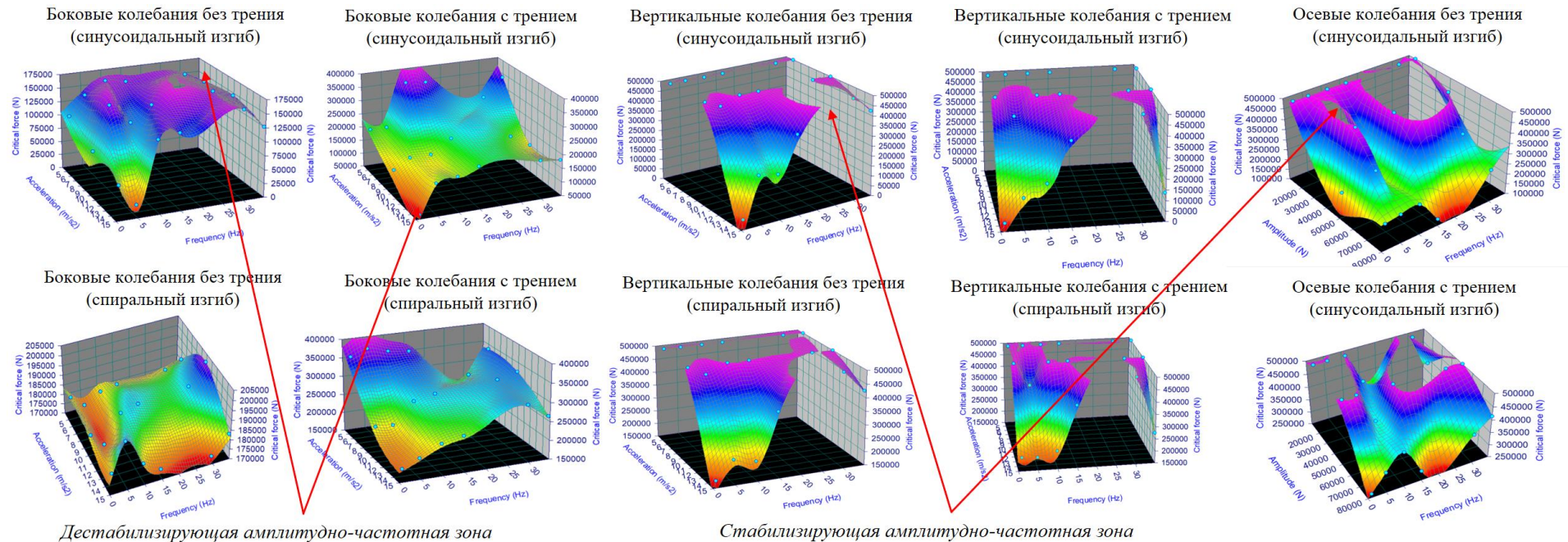


Рисунок 3 – Результаты численного моделирования влияния разночастотных и разноамплитудных колебаний на устойчивость буровой колонны

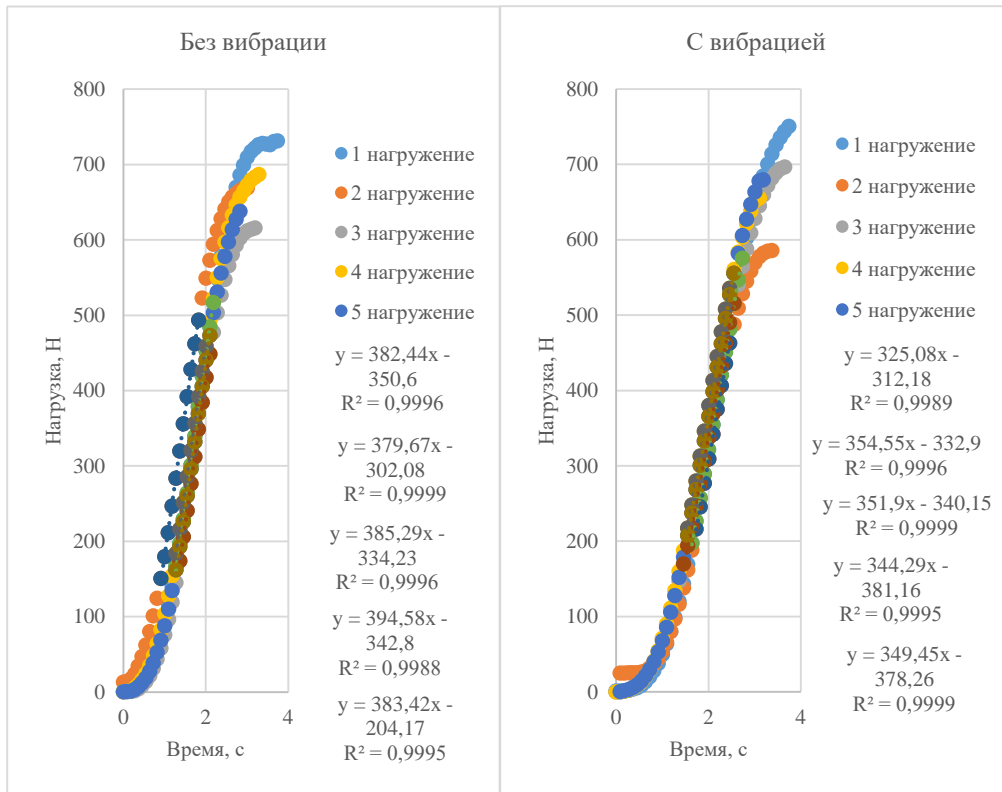


Рисунок 4 – Результаты лабораторных экспериментов влияния динамических условий на потерю устойчивости буровой колонны

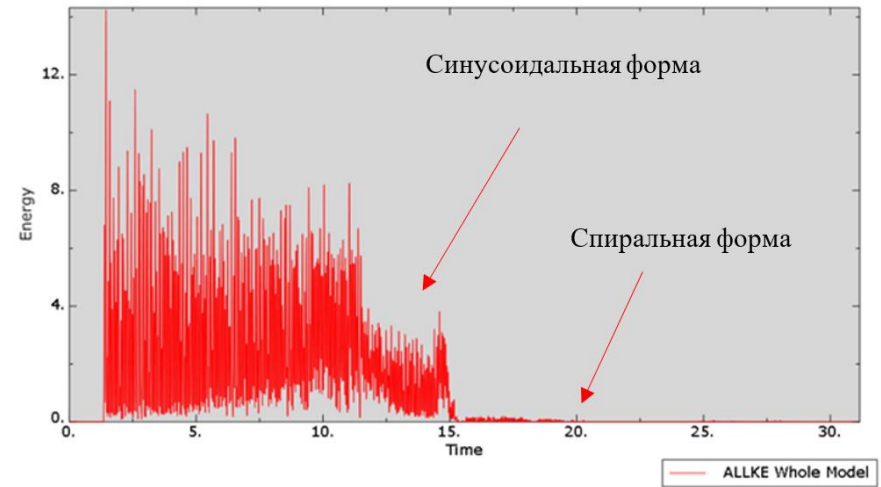


Рисунок 6 – Кинетическая энергия в численном эксперименте с боковыми колебаниями

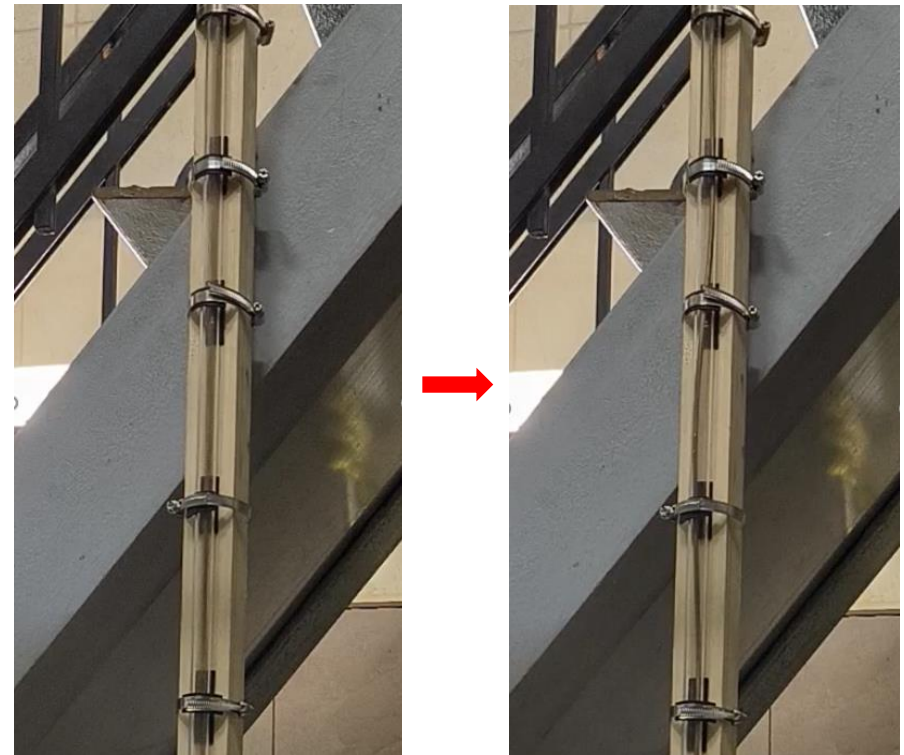


Рисунок 7 – Эффект затухания боковых колебаний при переходе в спиральную форму при проведении лабораторных экспериментов