

*На правах рукописи*

**Заикин Станислав Фёдорович**



**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ  
РЕЖИМА УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ  
БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ  
ИЗМЕНЕНИЯМ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА**

*Специальность 25.00.15 – Технология бурения  
и освоения скважин*

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

**Санкт-Петербург – 2017**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ухтинский государственный технический университет»

*Научный руководитель:*

доктор технических наук, профессор

*Быков Игорь Юрьевич*

*Официальные оппоненты:*

Хузина Лилия Булатовна, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт», кафедра «Бурение нефтяных и газовых скважин», заведующая кафедрой

Гержберг Юрий Михайлович, кандидат технических наук, ООО «Научно-производственное объединение

«Севернефтегазтехнология», генеральный директор

*Ведущая организация* – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Защита состоится 28 сентября 2017 г. в 11час 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.224.02 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21 линия, д.2, ауд.1163

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 28 июля 2017 года

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



Николаев  
Николай Иванович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Эффективность глубокого бурения определяется динамической устойчивостью работы бурильной колонны. В большинстве существующих систем регулирования режима работы бурильной колонны в качестве управляющих воздействий используют статические значения осевой нагрузки ( $P_d$ ) и угловой скорости вращения ( $\omega_d$ ), поэтому такие системы лишены возможности отслеживания динамических процессов при углублении скважины и не обеспечивают устойчивый режим работы бурильной колонны. Между тем процесс бурения характеризуется динамическим взаимодействием долота и разрушаемой им горной породы. Это взаимодействие преодолевается усилием бурового привода, создающего крутящий момент на колонне бурильных труб, вращающей долото. При этом любые силовые изменения на контакте работающего долота с забоем скважины оказывают влияние на изменение крутящего момента, который содержит весь комплекс волновой информации в его динамических составляющих. Разработка систем регулирования режима работы бурильной колонны по изменению динамических составляющих крутящего момента, обеспечивающих устойчивость работы бурильной колонны для повышения эффективности бурения, представляется весьма актуальной задачей.

**Цель работы:** Повышение эффективности бурения регулированием режима работы бурильной колонны.

**Идея работы** состоит в выделении динамических составляющих крутящего момента в качестве управляющих параметров, обеспечивающих устойчивость работы бурильной колонны.

### Основные задачи исследований

1. Выполнить анализ современных систем контроля и регулирования режима работы бурильной колонны при углублении скважины;

2. Исследовать динамические свойства и устойчивость бурильной колонны в процессе бурения;

3. Выбрать эффективный метод измерения динамических составляющих крутящего момента и обосновать управляющие параметры регулирования режима работы бурильной колонны;

4. Разработать аппаратную систему регулирования режима работы бурильной колонны.

**Методика исследований** включает в себя:

- методы дифференциального и интегрального исчисления;
- методы математического моделирования;
- основы построения систем автоматического регулирования;
- методы анализа устойчивости систем и объектов регулирования;
- экспериментальные и производственные исследования.

Полученные при проведении производственных исследований результаты анализировались и обрабатывались методами математической статистики.

**Научная новизна работы** состоит в установлении:

1) области устойчивой безвибрационной работы бурильной колонны на основе функциональной связи приращения момента сопротивления на трёхшарошечном долоте ( $\Delta M_k$ ) с частотой вращения ( $n_0$ ) и длиной бурильной колонны ( $H$ );

2) критерия оценки работы бурильной колонны ( $CritM$ ), характеризующего затраты энергии привода на бурение за один оборот, через отношение интенсивности изменения мощности на приводе к ускорению частоты вращения бурильной колонны.

**Защищаемые научные положения:**

1. Энергетический метод измерения динамических составляющих крутящего момента позволяет использовать их в качестве управляющих параметров для обеспечения режима устойчивой работы бурильной колонны при автоматизации процесса бурения.

2. Аппаратурная система регулирования режима работы бурильной колонны на основе измерения динамических составляющих крутящего момента повышает коэффициент полезного действия двигателя привода и механическую скорость бурения на 30%.

**Достоверность научных положений и выводов** определяется современным уровнем аналитических и достаточным объёмом экспериментальных исследований, высокой степенью сходимости их результатов и воспроизводимостью полученных данных.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке аппаратных систем регулирования режима устойчивой работы бурильной колонны на основе измерения динамических составляющих

крутящего момента для автоматической проводки скважины, защищённых патентами RU 2569652 C1, дата приоритета 16.05.2014, опубликовано 27.11.2015, бюл. №33; RU 2588053 C2, дата приоритета 05.11.2014, опубликовано 27.06.2016, бюл. №18. Опытные производственные испытания с помощью измерителя динамического приращения крутящего момента ИКРУМ, проведенные на Возейском месторождении при бурении скважины фирмой «ЭЛТЕХ», г. Усинска, Республики Коми показали возможность повышения эффективности бурения за счёт устранения вибраций вызванных неустойчивой работой буровой колонны. При этом потери энергии двигателя привода могут быть уменьшены на 47%, механическая скорость проводки ствола увеличена на 30%.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на:

- научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», 12-15.04.2011 г.; 17-20.04.2012 г.; 16-19.04.2013 г.; 22-25.04.2014 г.; 27.04.2015 г.;
- межрегиональных научно-практических конференциях «Современные проблемы нефтепромышленной и буровой механики» на базе ФГБОУ «Ухтинский государственный технический университет» 04.02.2012 г., 09.02.2013 г., 08.02.2014 г., 7.02.2015 г., 6.02.2016 г.;
- международной научно-практической конференции "Прикладные научные разработки", Чехия, Прага, 22-30 июля 2014 г.
- международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и техники», Россия, Белгород, 30 июня 2015 г.

Личный вклад автора. Проведен анализ современных систем регулирования режима работы буровой колонны. Исследована динамическая устойчивость буровой колонны в процессе бурения. Выбраны и обоснованы методы измерения динамических составляющих крутящего момента и введен критерий характеризующий работу буровой колонны в динамике. Математически обработаны результаты экспериментальных исследований на опытной скважине, подтверждающие эффективность критерия. Разработана система регулирования режима устойчивой работы буровой колонны.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 29 печатных работ. В том числе двадцать статей размещены в журналах, рекомендованных ВАК. Три статьи в зарубежных изданиях.

**Структура и объём диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Основная часть содержит 160 страниц, в т. ч. 78 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает 140 наименований. Общий объём работы с приложениями составляет 175 страниц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель, идея и основные задачи исследования, защищаемые научные положения, показаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**В первой главе** проведён анализ современных систем регулирования режима работы бурильной колонны. Существенный вклад в изучение проблем построения регуляторов режима работы бурильной колонны внесли Викерик В. И., Исакович Р. Я., Попадько В. Е., Перминов Б. А., Санников С. П., Спасибов В. М., Шубин К. В., Шамшев Ф. А., Шелковников И. Г. Демпси П., Нессьозн П. Я., Кюлингстад О и др. На примере существующих систем «Вектор 1», «Узбекистан 2А», «Зоя 1.1», «Леуза-2», «Контур-2», «ИВЭ-50», фирм Drill-AU-MationInc, Dresser Macgobar, Baroid и др. показано, что в качестве основных управляющих воздействий в системах регулирования применяются текущие статические значения режимных параметров бурения. Построение регуляторов на основе статических параметров не позволяет отслеживать динамические процессы работы бурильной колонны в скважине и не позволяет управлять автоколебаниями, обеспечивая устойчивый режим её работы.

Выявлены направления совершенствования систем регулирования режима устойчивой работы бурильной колонны. Показано, что использование динамического изменения крутящего момента на двигателе привода ротора буровой установки в качестве управляющего воздействия является более информативным параметром регулирования.

Проведён обзор средств измерения крутящих моментов. На ос-

нове работ российских и зарубежных учёных (Демихов В. И., Леонов А. И., Фролов Л. В., Ермолкин О. В., Орлов Л. И., Новоженин А. А., Ягубов З. Х., Перминов Б. А., Демпси П., Vandiver J. K., Nicholson J., Shyu R. J. и др.) выполнена классификация средств измерения крутящего момента, определены наиболее эффективные методы его измерения.

В результате выполненного анализа сформулирована цель, идея диссертационной работы, и задачи исследований направленные на совершенствование теории и практики бурения скважин.

**Во второй главе** описаны используемые в работе методы исследований: методы аналитического анализа на базе известных физико-математических моделей бурильной колонны и зависимостей динамических параметров её работы, методы построения и анализа структурных схем, методы исследования модели средствами MATLAB и PDS, метод экспериментальных исследований.

На основе анализа многомассовой цепочной модели бурильной колонны, обоснована двухмассовая физико-математическая её модель, содержащая две сосредоточенные массы с моментами инерции  $J_1$ ,  $J_2$  и упругой связью жесткостью  $C_{12}$ . При этом поведение масс описывается системой уравнений:

$$M_{0в}(t) - M_{смп1}(t) - M_{емп1}(t) - M_{12}(t) = J_1 \frac{d^2\omega_1}{dt^2}, \quad (1)$$

$$M_{12}(t) - M_{смп2}(t) - M_{емп2}(t) = J_2 \frac{d^2\omega_2}{dt^2}, \quad (2)$$

$$M_{12}(t) = C_{12} \Delta\varphi. \quad (3)$$

$$M_{емп,1} = \bar{\beta}_{1,2} \omega_1(t), \quad M_{емп,2} = \bar{\beta}_{1,2} \omega_2(t); \quad (4)$$

где  $M_{0в}$  – момент двигателя привода;  $M_{смп}$  – момент сухого трения;  $M_{емп}$  – момент вязкого трения;  $M_{1,2}$  – упругий момент связи;  $\beta_{12}$  – коэффициент вязкого трения,  $\Delta\varphi$  – угол закручивания.

На основе адаптированной математической модели (1–4) получена структурная схема, которая приведена на рис. 1. Исследования структурной схемы по рис. 1 в пакетах MATLAB и PDS для динамических систем позволили сделать вывод о том, что при наличии вязкого трения бурильная колонна имеет границу устойчивости, а переходные процессы при переключении режимов работы всегда сопровождаются её автоколебаниями.

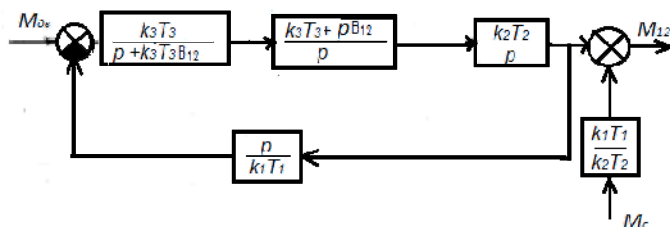


Рисунок 1 – Структурная схема двухмассовой модели бурильной колонны

**Третья глава** посвящена исследованию свойств и параметров бурильной колонны в процессе её работы. Выявлены на базе методик, предложенных в работах А. Гринхила, А. Н. Динника, А. Е. Сарояна, Л. С. Лейбензона, И. Л. Барского, Л. К. Горшкова функциональные зависимости основных параметров динамики бурильной колонны и определены критические значения её длины, осевой нагрузки, крутящего момента и угловой скорости. Показано, что при возрастании осевой нагрузки возникают соударения бурильной колонны о стенки скважины и выявлена зависимость частоты колебаний соударений от величины этой нагрузки. На основе работ Е. К. Юнина и В. К. Хегая выделены области безвибрационной работы бурильной колонны в параметрах момент сопротивления на долоте в зависимости от частоты вращения и длины колонны. На рис. 2 построена диаграмма момента сопротивления на долоте ( $M_h$ ) в зависимости от длины колонны ( $H$ ) при частоте вращения ротора  $n_0 = 90$  об/мин, коэффициенте диссипации  $\mu = 1\text{с}^{-1}$ . При этом существует длина колонны, при которой исчезает область крутильных колебаний, и переход из области равномерного вращения осуществляется сразу в область стопорения.

На трёхмерной диаграмме ( $M_h, \omega_0, H$ ) рис. 3 построена оптимальная область работы бурильной колонны, которая находится ниже поверхности, ограничивающей снизу область развития крутильных автоколебаний.



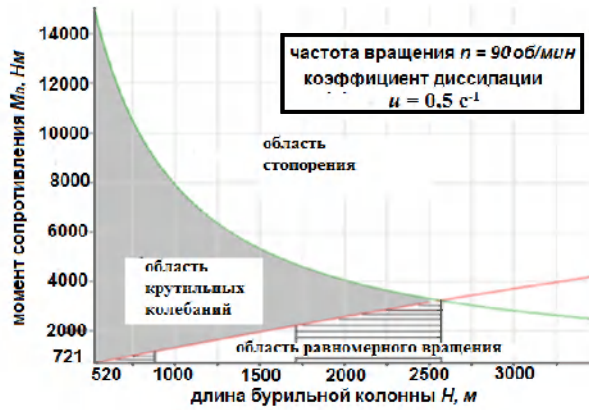


Рисунок 2 – Вид диаграммы «момент сопротивления – длина колонны»

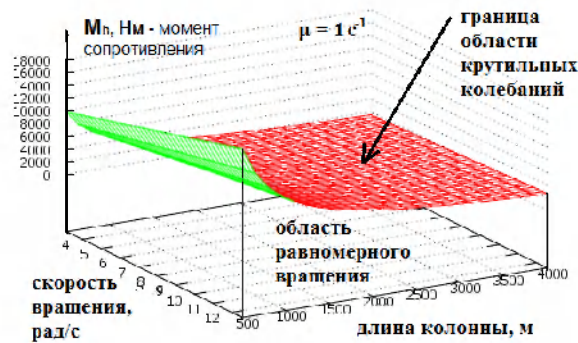


Рисунок 3 – Оптимальная область поведения буровой колонны при  $\mu = 1 \text{ c}^{-1}$

Существование оптимальных областей позволяет разработать программу регулирования режима работы буровой колонны в зависимости от её длины и частоты вращения.

Исследована устойчивость работы буровой колонны с использованием частотных методов анализа. Так как согласно структурной модели буровой колонны передаточная функция разомкнутой системы определяется выражением:

$$W(j\omega) = \frac{\beta_{12}c_{12}}{J_1 J_2 (j\omega)^2} = j \frac{K}{\omega^2}, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент передачи структуры, то амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) структурной модели определится рис. 4а, из которого следует, что фазный сдвиг АФЧХ будет всегда больше  $270^\circ$ , т.е. области АФЧХ всегда будет принадлежать точка неустойчивости  $(-1; 0)$ , что характеризует буровую колонну как структурно неустойчивый объект регулирования.

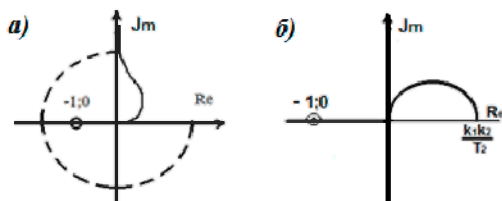


Рисунок 4 – АФЧХ структуры буровой колонны

АФЧХ структурной модели буровой колонны с учётом вязкого трения описывается выражением 6:

$$W_o(j\omega) = \frac{k_1 k_2 (k_2 + j\omega)}{T_1 T_2 j\omega^2 + T_2 \omega^2} \quad (6)$$

Согласно выражению 6 частотная характеристика проходит через область критической точки  $(-1; 0)$ , что определяет граничное условие устойчивости объекта регулирования. (Рис. 4б). Это означает, что введение корректирующих частотных звеньев в схему регулирования аппаратных систем способно преобразовать неустойчивый объект регулирования в устойчивый при соответствующей модернизации.

**Четвёртая глава** посвящена измерению крутящего момента и его динамических составляющих на валу двигателя привода буровой установки. Для компенсации автоколебаний классические методы регулирования режима работы буровой колонны не применимы. Решение этой задачи возможно при использовании адаптивных самонастраивающихся систем, в которых происходит отслеживание динамики буровой колонны и регулирование её работы по динамическим параметрам. В связи с этим возникает проблема выделения динамических параметров регулирования. Предлагается измеритель крутящего момента, который может быть использован в установках с любым приводом. Общая структура дифференциальных

измерений приведена на рис. 5.

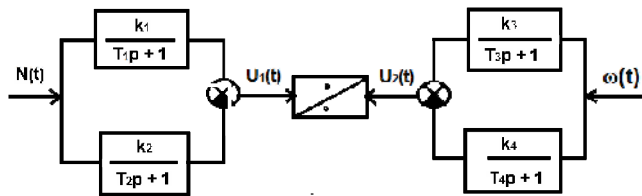


Рисунок 5 – Структурная схема дифференциального измерителя

Согласно приведённой структуре оба канала измерения объединяются блоком деления, реализующим операцию:

$$\frac{W_{N_1}(p)}{W_{\omega}(p)} = \frac{\frac{k_1 p(T_2 - T_1)}{T_1 T_2 p^2 - (T_2 - T_1)p - 1}}{\frac{k_2 p(T_4 - T_3)}{T_3 T_4 p^2 + (T_4 + T_3)p + 1}} = \frac{k}{k'} = K, \quad (7)$$

при условии  $T_1 = T_3$ ,  $T_2 = T_4$ , что выполнимо, так как параметры  $T_1, T_2, T_3, T_4$  – являются параметрами настройки.

Таким образом, в результате деления на выходе устройства можно получить статическое значение измеряемой величины, свободное от статической ошибки вследствие дифференцирования:

$$M = K \frac{\Delta N}{\Delta \omega}, \quad (8)$$

где  $\Delta N$  – приращение мощности двигателя привода, Вт;  $\Delta \omega$  – приращение угловой скорости вала привода, рад/с.

Проведён анализ погрешности измерения дифференциальной структуры. Относительная погрешность структуры теоретически сводится к нулю, в реализованном на практике измерителе ИКРУМ не превышает 1 %.

Структура может быть синтезирована с использованием дифференцирующих фильтров на контроллере, что позволяет получить высокую чувствительность каналов измерения без дополнительных средств усиления, что упрощает комплектацию и повышает надёжность прибора.

Проведён выбор эффективного критерия регулирования режима работы буровой колонны ( $CritM$ ) как частного от деления интенсивности изменения мощности привода к угловому ускорению вращения буровой колонны, характеризующего расход энергии привода за один оборот. При измерении  $CritM$  возможно рассмотрение

следующих частных случаев:

1.  $CritM = 0$ . Случай возможен если  $\frac{dN}{dt} = v_{zv} = 0$ , т.е. мощность на валу привода колонны бурильных труб постоянна или равна 0. Так как анализ проводится в процессе углубления скважины, то случай  $N = 0$  в анализ режима не входит, и будем считать, что мощность на валу привода постоянна  $N = const$ . Случай  $CritM = 0$ , определяет равномерный установившийся процесс работы бурильной колонны при отсутствии автоколебаний. Изменения скорости вращения  $\frac{d\omega}{dt}$  при этом не приводят к дополнительным затратам энергии привода колонны бурильных труб.

2.  $CritM \neq 0$ . Случай характеризуется ростом критерия  $CritM$  или его спадом. При росте критерия  $CritM > 0$  возможно возникновение стопорения колонны бурильных труб, при спаде  $CritM < 0$  возникает явление проскальзывания. Случай характеризует начало возникновения крутильных автоколебаний.

3.  $CritM \rightarrow \infty$ . Случай возможен, если угловое ускорение  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . Гипотетический вариант этого случая возможен либо при  $\omega = 0$ , либо при  $\omega = const$ . Если  $\omega = 0$ , то это означает, либо отсутствие вращения колонны бурильных труб ( $M = 0$ ), либо их полное стопорение (аварийный режим), т.е. возникает неопределённость измерения параметров бурения. При  $\omega = const$  режим работы бурильной колонны устойчивый, равномерный с отсутствием автоколебаний. Анализ показывает, что использование критерия  $CritM$  для регулирования режима работы бурильной колонны не является самодостаточным условием, так как измерение этого параметра сопровождается неопределённостями вида  $CritM = 0$  и  $CritM \rightarrow \infty$ . Однако, используя отдельно каналы измерения  $N$  и  $\omega$  на базе дифференцирующих фильтров, легко реализовать эффективное регулирование режима работы бурильной колонны. Действительно, если канал измерения  $N$  даёт результат изменения  $\frac{dN}{dt} = 0$ , а канал измерения  $\omega$  результат соответствующий  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ , то процесс углубления скважины равномерный с полным отсутствием автоколебаний. При  $\frac{dN}{dt} > 0$  и  $\frac{d\omega}{dt} < 0$  наблюдается процесс

стопорения колонны бурильных труб, при  $\frac{dN}{dt} < 0$  и  $\frac{d\omega}{dt} > 0$  проскальзывание.

На основе этих посылок разработан способ измерения динамических составляющих крутящего момента (рис. 6) с использованием типового контролера и аналого-цифрового преобразователя АЦП – 4.

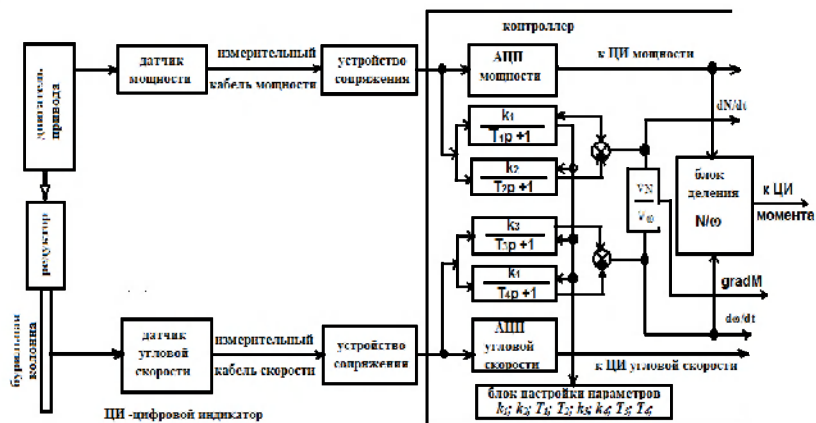


Рисунок 6 – Функциональная схема измерения динамических составляющих крутящего момента

**В пятой главе** рассмотрены результаты опытно-производственных исследований на опытной скважине фирмы «ЭЛТЕХ», г. Усинска, Республики Коми по измерению динамических составляющих крутящего момента. Для измерений применялся измеритель динамического приращения крутящего момента ИКРУМ. Прибор позволяет получить осциллограммы измерений крутящего момента, приращения крутящего момента и потребляемой мощности при различных осевых нагрузках. В результате получила экспериментальное подтверждение двухмассовая модель бурильной колонны и осуществлена оценка потерь мощности и механической скорости бурения за счёт автоколебаний и колебаний, вызванных соударениями бурильной колонны о стенки скважины.

На рис. 7 приведены осциллограммы изменения приращения крутящего момента при осевой нагрузке 120 кН и 180 кН и длине колонны 2000 м. Из них можно сделать вывод, что работа бурильной

колонны сопровождается автоколебаниями, частота которых совпадает с расчётной на основе двухмассовой модели и колебаниями соударений, частота которых накладывается на частоту автоколебаний. Возникновение колебаний соударений определяется критическими значениями осевой нагрузки  $P_{кр}$  и длины бурильной колонны  $l_{кр}$ .



осциллограмма приращения крутящего момента при  $P = 120$  кН



осциллограмма автоколебаний приращения крутящего момента с наложением биений

Рисунок 7 – Осциллограммы динамического приращения крутящего момента

На рис. 8 приведены осциллограммы мощности двигателя привода в реальном времени при различных осевых нагрузках. При осевой нагрузке 120 кН изгибные полуволны по длине колонны отсутствуют, соударения возможны только в результате эксцентриситета осей вращения колонны. Отбор мощности на колебания соударений не превышает долей процента. При 140 кН бурильная колонна теряет устойчивость формы, появляются изгибные полуволны, соударение которых со стенками скважины приводит к появлению колебаний, при этом отбор мощности от двигателя привода резко возрастает. С дальнейшим увеличением осевой нагрузки частота этих колебаний нарастает вследствие увеличения числа изгибных полуволн по длине колонны бурильных труб. Отбор мощности от двигателя привода достаточно велик и составляет порядка 47 %. При осевой нагрузке  $P = 180$  кН число изгибных полуволн по длине бурильной колонны ещё более возрастает, колонна укладывается вдоль стенок скважины, что приводит к исчезновению колебаний, вызванных со-

ударением колонны о стенки скважины и снижению отбора мощности от двигателя привода.

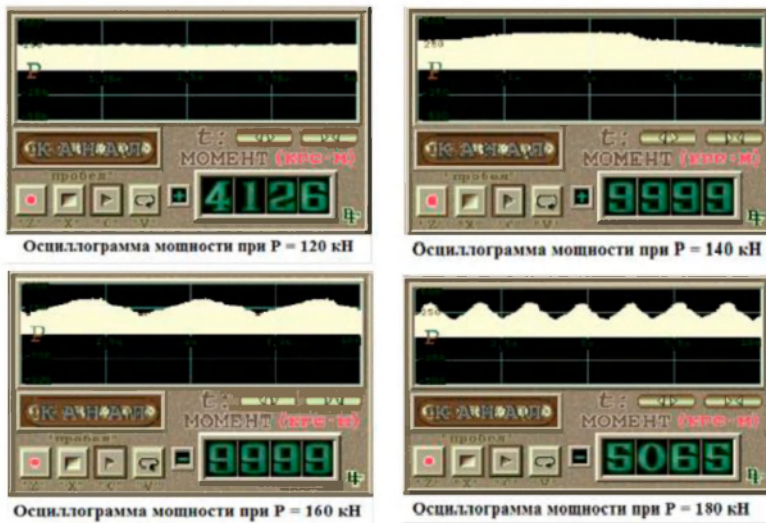


Рисунок 8 – Осциллограммы мощности при различных осевых нагрузках

На рис. 9 приведён график отбора мощности на преодоление колебаний соударений в зависимости от осевой нагрузки в процентах.

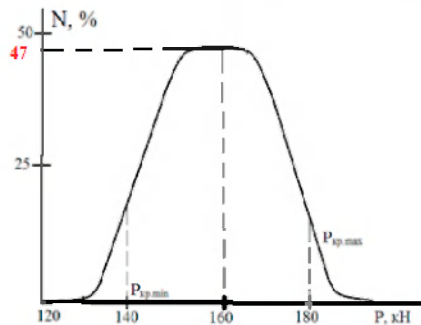


Рисунок 9 – Отбор мощности на преодоление колебаний соударений

Из графика следует, что для заданной конструкции бурильной ко-

лонны и скорости её вращения, экстремальный диапазон работы приходится на интервал осевых нагрузок 150 – 170 кН. Оценка влияния автоколебаний на механическую скорость проходки показала, что крутильные колебания уменьшают механическую скорость бурения на 24 %, продольные на 8,2 %. Суммарно автоколебания снижают механическую скорость бурения на 32 %.

Таким образом, регулирование режима работы бурильной колонны по динамическим составляющим крутящего момента на основе выбора оптимальных значений параметров бурения из области безвибрационной работы в зависимости от её длины обеспечивает увеличение на треть механической скорости бурения.

**В шестой главе** предложены этапы разработки аппаратурных систем. Для повышения устойчивости работы рекомендовано введение в структурную схему регулирования частотных корректирующих звеньев. В качестве примера такой частотной коррекции предложена функциональная схема регулирования режима работы бурильной колонны с использованием ПИД-регулятора. Ввод ПИД-регулятора в систему автоматического регулирования позволяет преобразовать неустойчивый объект в устойчивый, т.е. в процессе регулирования исключить срыв в автоколебательный режим. В результате разработана аппаратурная система регулирования режима устойчивой работы бурильной колонны по динамическим составляющим крутящего момента. Система базируется на измерении динамических составляющих крутящего момента на валу двигателя привода буровой установки. Определяется крутящий момент, интенсивность изменения мощности  $\frac{dN}{dt} = v_N$ , ускорение вращения инструмента  $\frac{d\omega}{dt} = v_\omega$  и  $CritM$ . По величине и знаку составляющих проводится регулирование режима устойчивой работы бурильной колонны.

### **Заключение**

1. Анализ современных систем контроля и регулирования режима работы бурильной колонны показал, что в качестве управляющих воздействий они используют статические значения режимных параметров бурения и не реагируют на динамические параметры, способные обеспечить режим устойчивой её работы.



2. Существуют области безвибрационной работы бурильной колонны и критические значения динамических параметров, при которых она теряет устойчивость в процессе бурения. Наиболее информативным параметром работы бурильной колонны, является параметр приращение крутящего момента и его составляющие интенсивность изменения мощности двигателя привода и ускорение вращения его вала.

3. Двухмассовая адаптированная физико-математической модель бурильной колонны, содержащая две сосредоточенные массы с моментами инерции  $J_1$  и  $J_2$  и жёсткостью  $C_{12}$ , адекватно описывает изменения её параметров. Исследование этой модели с использованием пакетов MATLAB и PDS показало, что переходные процессы при переключении режимов бурения сопровождается автоколебаниями бурильной колонны, а работа бурильной колонны имеет границу устойчивости при диссипативном влиянии вязкой среды, что позволяет разработать предложения по реализации режима устойчивой её работы для повышения качества строительства скважин.

4. Энергетический метод, реализуемый дифференциальной структурой на параллельно встречных апериодических звеньях в двухканальном измерителе «Икрум» позволяет выделить приращение крутящего момента и его составляющие в качестве управляющих параметров регулирования режима работы бурильной колонны.

5. Разработаны автоматические аппаратные системы регулирования режима устойчивой работы бурильной колонны, обеспечивающие увеличение коэффициента полезного действия двигателя привода и механической скорости бурения на треть. Патенты RU 2569652 C1, опубликован 27.11.2015, бюл. №33; RU 2588053 C2, опубликован 27.06.2016, бюл. №18.

**Основные положения диссертации опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ в следующих статьях:**

1. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А. Дифференциальная (вариационная) структура измерителя крутящего момента на валу электродвигателя буровых установок // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. – №8. – С. 5 – 9.

2. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А. Оценка метрологических

точностных характеристик дифференциальной (вариационной) структуры измерителя крутящего момента на валу силового привода буровых установок // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. – №7. – С. 14 – 16.

3. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А. Колонна бурильных труб в процессе углубления скважины, как объект автоматического регулирования // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – №10. – С. 13 – 17.

4. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А. Оптимизация управления процессом углубления скважины // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: 2012. – №10. – С. 17 – 21.

5. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов В. Б. Определение наброса момента сопротивления, действующего на бурильную колонну в оптимальных рабочих зонах параметров бурения // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: 2014. – №4. – С. 33 – 40.

6. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Динамические свойства бурильной колонны // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: 2014. – №8. – С.4 – 8.

7. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Влияние осевой нагрузки на динамику бурильной колонны // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: 2014. – №8. – С. 22 – 28.

8. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Возможность использования динамических составляющих параметров крутящего момента для управления процессом углубления скважины // Инженер-нефтяник. – 2014. – №3. – С. 20 – 22.

9. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Методы управления процессом углубления скважины // Инженер-нефтяник. – 2014. – №3. – С. 23 – 27.

10. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Способ измерения параметров бурения с использованием вариационной структуры // Инженер-нефтяник. – 2014. – №3. – С. 27 – 29.

11. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Экспериментальная проверка основных теоретических положений динамики бурильной колонны // Инженер-нефтяник. – 2014. – №3. – С. 30 – 33.

12. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б.

Структурное моделирование бурильной колонны // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: 2014. – №10. – С. 13 – 18.

13. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Переходные процессы при различных режимах работы бурильной колонны // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014. – №11. – С. 8 – 12.

14. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Частотные свойства бурильной колонны как объекта управления // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014. – №11. – С. 13 – 15.

15. Заикин С. Ф. Влияние биений бурильной колонны на отбор мощности в процессе углубления скважины // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – №7. – С. 4 – 6.

16. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б., Ягубов З. Х. Биения бурильной колонны в процессе углубления скважины // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – №9. – С. 14 – 16.

17. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Влияние автоколебаний на механическую скорость бурения // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – №9. – С. 17 – 19.

18. Заикин С. Ф. Экспериментальная оценка существующих подходов к расчету затрат мощности привода бурильной колонны на проходку скважины // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – №12. – С. 4 – 6.

19. Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б., Ягубов З. Х., Ягубов Э. З. Структурное моделирование бурильной колонны как эффективный метод исследования её динамических свойств // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. – №1. – С. 4 – 8.

20. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А. Совершенствование аппаратной системы регулирования режима работы бурильной колонны на основе измерения динамических параметров крутящего момента // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: 2016. – №5. – С. 4 – 8.

#### **В других изданиях и материалах конференций:**

1. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А. Оптимизация управления процессом углубления скважины: Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (17-20 апреля 2012 г.): В 3 ч.; Ч. 1 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2012. – С. 135 – 140.

2. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Методика

- измерения параметров бурения с использованием вариационной структуры: Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (20-25 апреля 2014 г.): В 3 ч.; Ч. I / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2014. – С. 132 – 134.
3. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б. Экспериментальная проверка основных теоретических положений динамики бурильной колонны: Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (20-25 апреля 2014 г.): В 3 ч.; Ч. I / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2014. – С. 134 – 139.
4. Заикин С. Ф., Перминов Б. А. Исследование структурной модели бурильной колонны в пакете MatLab Сборник научных трудов (Текст): Материалы X-ой международной научно-практической конференции «Прикладные научные разработки - 2014» (25 июля - 6 августа 2014 года): / под ред. Publishing House “Education and Science” s.r.o. (Чехия, Прага), 2014. – С. 27 – 32.
5. Заикин С. Ф., Быков И. Ю., Перминов Б. А. Оценка влияния биений бурильной колонны на механическую скорость бурения // Современные тенденции развития науки и технологий: сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции 30 июня 2015 г.: в 6 ч. / Под общей редакцией Е. П. Ткачевой. – Белгород: ИП Ткачёва Е. П., 2015. – Часть 1. – С. 70 – 75.
6. Bikov I., Zaikin S., Perminov B., Perminov V., Poletaev S., Yagubov Z. Investigation of the structural model of the drillstring // DOAJ - Lund University: Konzept : Scientific and Methodological e-magazine. - Lund, №4 (Collected works, Best Article), 2014. – URL: <http://www.doaj.net/2385/>
7. Bikov I., Zaikin S., Perminov B., Perminov V., Poletaev S., Yagubov Z. The frequency characteristics of the drill string as a management object // DOAJ - Lund University: Konzept: Scientific and Methodological e-magazine. - Lund, №4 (Collected works, Best Article), 2014. - URL: <http://www.doaj.net/2386/>
8. Пат. RU 2569652 С1, МПК E21B44/00 Способ управления процессом бурения и система для его осуществления [Текст] / Ягубов З. Х., Перминов Б. А., Перминов В. Б., Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Полетаев С. В.; заявлено 16.05.2014; опубл. 27.11.15, Бюл. № 33.
9. Пат. RU 2588053 С2, МПК E21B 44/00 Способ управления процессом бурения и система для его осуществления [Текст] / Цхадая Н. Д., Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А., Перминов В. Б., Хсгай В. К., Ягубов З. Х.; заявлено 05.11.2014; опубл. 27.06.16, Бюл. № 18.