

На правах рукописи

Куншин Андрей Андреевич



**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ НАГРУЗКИ НА ДОЛОТО PDC
В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН**

*Специальность 25.00.15 – Технология бурения и освоения
скважин*

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

Санкт-Петербург – 2021

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Двойников Михаил Владимирович

Официальные оппоненты:

Хузина Лилия Булатовна

доктор технических наук, доцент, государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт», кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, заведующий кафедрой;

Мелехин Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра нефтегазовых технологий, доцент.

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

Защита состоится 3 февраля 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.02 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 3 декабря 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



БЛИНОВ

Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Возрастающие объемы потребления углеводородного сырья обуславливают освоение новых месторождений нефти и газа. Темпы ввода их в эксплуатацию во многом зависят от качественного и эффективного строительства скважин. Причем снижение капитальных затрат от 15 до 20 % можно достичь за счет применения инновационных технико-технологических решений в процессе бурения скважин. К наиболее передовым технологиям мирового уровня, позволяющим оптимизировать процесс бурения относятся новые виды контроля, управления и прогнозирования напряженно-деформированного состояния (НДС) динамически активной системы бурильного инструмента.

Известно, что фактическая нагрузка на долото является дискретной величиной и складывается из статической и динамической составляющих.

Особенно это касается процесса бурения, где в качестве породоразрушающего инструмента (ПРИ) используются долота режуще-скалывающего действия *PDC* – лопастное долото с поликристаллическими алмазными вставками.

Высокая степень неоднородности и переслаивания горных пород в процессе их разрушения, а также недостаточная контролируемость НДС бурильного инструмента и режимных параметров бурения ведет к невозможности адекватной оценки фактической нагрузки на долото *PDC* и снижению эффективности проводки скважин.

Например, при роторном бурении или комбинированном способе углубления скважины с использованием гидравлических забойных двигателей (ГЗД) могут возникать сложно контролируемые крутильные, торсионные, продольные и поперечные колебания бурильной колонны (БК). Данные формы колебаний обуславливают возникновение мгновенной неконтролируемой вибрации, в том числе латеральных и аксиальных ударов компоновки низа бурильной колонны (КНБК) о горную породу, что приводит к резкому падению механической скорости бурения, потере продольной устойчивости инструмента, а также риску аварийных ситуаций в скважине.

Изменяющиеся частоты и амплитуды биений долот *PDC* математически сложно определимы. На практике для измерения вибрации долота в телеметрической системе располагается трехпозиционный акселерометр. Согласно паспортным данным применяемого оборудования для геофизических исследований скважин (ГИС), а также во избежание повреждений элементов колонны, действуют ограничения виброускорения от 30 до 45 g. В результате несвоевременного регулирования режимных параметров бурения, обусловленных скоростью передачи информации и откликом автоматической системы управления верхнего привода, виброускорение может составить более 100 g, что приводит к отклонению от проектной траектории и снижению качества ствола скважины или отвороту и излому бурильного инструмента.

Повышение эффективности бурения скважин возможно за счет разработки технологии оперативного управления нагрузкой на долото и прогнозирования сбалансированности системы статической и динамической составляющих фактической нагрузки на долото *PDC* на основе интерпретации данных виброускорения и геомеханических свойств горных пород, получаемых в режиме реального времени с телеметрических систем КНБК.

Степень проработанности темы исследования

В настоящее время существует большое количество технических средств и технологических решений контроля и управления параметрами бурения, а также методов получения более достоверной информации, получаемой с забоя по каналам связи с датчиков, устанавливаемых в телеметрических системах КНБК.

Большой вклад в решение задач динамики БК в процессе бурения скважин внесли исследования отечественных и зарубежных ученых.

Среди отечественных ученых можно выделить труды Балденко Д.Ф., Балицкого П.В., Белоруссова В.О., Бикчурина Т.Н., Буслаева В.Ф., Грачева Ю.В., Григоряна А.М., Дмитриева В.Н., Калинина А.Г., Кулябина Г.А., Лебедева Н.Ф., Лукьянова Э.Е., Мавлютова М.Р., Мищенко Р.Н., Нескоромных В.В., Погарского А.А., Попова А.Н., Рогоцкого Г.В., Симонова В.И., Симонянца С.Л., Спивака А.И., Султанова Б.З., Филимонова Н.М., Федорова В.С.,

Хегая В.К., Хузиной Л.Б., Эйгелеса Р.М., Юнина Е.К., Ямалиева В.У., Янтурина А.Ш.

Наиболее значимые труды зарубежных ученых в области формирования и прогнозирования динамики БК принадлежат *K. Blackwood, D.F. Brevdo, S.L. Chen, A.P. Christoforou, M.W. Dykstra, E.M. Galle, R.F. Mitchell, P.D. Spanos, Van Den Stein, H.V. Woods, A.S. Yigit.*

Однако в работах перечисленных авторов не рассмотрен вопрос возможности оценки ударно-вращательного импульса КНБК, формирующего фактическую нагрузку на долото *PDC*.

Объект исследования – оперативный контроль и управление процессом бурения скважин.

Предмет исследования – динамическая составляющая нагрузки на долото *PDC* с учетом ударно-вращательного импульса КНБК.

Цель работы – повышение эффективности бурения скважин разработкой технологии оперативного контроля и управления фактической нагрузкой на долото *PDC*.

Идея работы заключается в оперативном управлении фактической нагрузкой на долото режуще-скалывающего действия (*PDC*) с определением ударно-вращательного импульса КНБК на основе данных о петрофизических свойствах горных пород по литолого-стратиграфическому разрезу бурящейся скважины и результирующих колебаниях телеметрической системы в режиме реального времени.

Основные задачи исследования:

1. Теоретическое обоснование и научное подтверждение необходимости и целесообразности мониторинга и прогнозирования процесса формирования нагрузки на долото *PDC* при бурении скважин.

2. Экспериментальные исследования продольных и поперечных деформаций образцов горных пород для определения ударно-вращательного импульса КНБК.

3. Разработка математической модели, позволяющей определить энергоэффективный ударно-вращательный импульс

КНБК в зависимости от ее виброускорения и объемного разрушения горной породы долотом *PDC*.

4. Разработка технологии мониторинга и прогнозирования энергоэффективной нагрузки на долото *PDC* при бурении скважин.

5. Опытно-промысловые испытания (ОПИ) и верификация разработанной математической модели и технологии мониторинга и прогнозирования энергоэффективной нагрузки на долото *PDC*.

Научная новизна работы

1. Полученная зависимость ударно-вращательного импульса КНБК, на основе интерпретации данных виброускорения телеметрической системы и геомеханических свойств горных пород в режиме реального времени, позволяет определить фактическую нагрузку на долото *PDC*.

2. На основе предложенного коэффициента разгрузочной способности КНБК разработана математическая модель, позволяющая определить энергоэффективную нагрузку на долото *PDC* в зависимости от объемных результирующих напряжений в горной породе, возникающих в результате режуще-скалывающего действия резцов *PDC* в процессе бурения скважин.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана математическая модель для расчета энергоэффективной нагрузки на долото *PDC* в процессе бурения скважин, позволяющая сбалансировать систему статической и динамической составляющих фактической нагрузки на долото.

2. Разработан алгоритм и программный комплекс, позволяющий, используя данные ГИС и параметров бурения с датчиков телеметрии в режиме реального времени, прогнозировать фактическую нагрузку на долото *PDC* для энергоэффективного и безаварийного строительства скважин.

3. Разработанные математическая модель и алгоритмы определения параметров бурения с использованием в качестве ПРИ долота *PDC* включены в состав учебно-методического комплекса для обучения бакалавров и магистров по направлениям подготовки 21.03.01, 21.04.01 «Нефтегазовое дело» Горного университета.

Методология и методы исследований

В теоретическом исследовании использованы алгоритмы цифровых информационных ресурсов авторской документации в соответствии с предметом исследований. В вычислительных экспериментах использованы методы машинного обучения для решения задачи классификации промышленных данных и корреляционный анализ в среде объектно-ориентированного языка программирования *Python*, методы математической статистики, в том числе корреляционно-регрессионный анализ. Математическая модель разработана на основе положений гипотезы малости деформации, четвертой теории прочности и теории Пальмгрена-Майнера.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный коэффициент разгрузочной способности КНБК равен отношению затрачиваемых осевой энергии к энергии вращения позволяет определить энергоэффективную нагрузку на долото *PDC*.

2. Разработанный алгоритм мониторинга фактической нагрузки на долото *PDC*, включающий критерий оценки энергоэффективного разрушения горной породы, основой которого являются режимные параметры бурения и ГИС с учетом виброускорения КНБК и объемных результирующих напряжений в горной породе, позволяет сбалансировать систему статической и динамической составляющих фактической нагрузки на долото.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Степень достоверности защищаемых научных положений, выводов и рекомендаций основана на сходимости и воспроизводимости результатов лабораторных и вычислительных экспериментов. Верификация разработанной математической модели и алгоритмов осуществлена на основе ОПИ при бурении скважины самоходной буровой установкой *GM 200 GL* на полигоне «Нефтяник» Горного университета.

Апробация результатов диссертации работы проведена на российской технической конференции «SPE Russian Petroleum Technology Conference» (Москва, 2018); 12-й Российско-германской сырьевой конференции (Санкт-Петербург, 2019); международной

научно-практической конференции «Рассохинские чтения» (Ухта, 2021).

Личный вклад автора. Проведены теоретические и экспериментальные исследования, в результате которых разработана математическая модель и алгоритм для создания технологии мониторинга и прогнозирования энергоэффективной нагрузки на долото *PDC* в процессе бурения скважин. Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. На уровне изобретения разработано устройство амортизатора наддолотного, способствующего повышению эффективности бурения скважин, в том числе в интервалах перемежающихся по прочности пропластков горных пород.

Публикации. Результаты диссертационной работы освещены в 7 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 1 статье – в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования *Scopus*. Получен 1 патент на изобретение и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав, с выводами по каждой их них, заключения, списка литературы, включающего 116 наименований. Работа изложена на 116 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка, 11 таблиц, список сокращений и условных обозначений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено описание исследований, обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи и идея работы.

В первой главе, по результатам теоретических исследований технологических и технических решений в области контроля и управления режимными параметрами вращательного способа бурения, определено, что применяемые методы и методики эксплуатации устьевого оборудования, забойных телеметрических

систем и элементов КНБК не учитывают динамическую составляющую нагрузки на долото.

Однако, проведенный анализ результатов исследований динамики работы инструмента при разных способах вращательного бурения показал, что, в следствие вращения инструмента и контакта долота с горной породой происходят периодические неконтролируемые биения (вибрации) КНБК и БК. Вибрации представлены осевыми, боковыми и крутильными (торсионными) биениями и возникают в результате несоответствия режимных параметров бурения, т.е. превышения осевой нагрузки, приводящей к потере устойчивости инструмента, заклинивания вооружения долота *PDC* в горной породе и др.

Существующие системы автоматического контроля и управления процессом бурения позволяют решить вопрос компенсации критического виброускорения и колебаний КНБК. Для снижения «шоковых» колебаний, регистрируемых забойными датчиками телеметрической системы *MWD* (измерение забойных параметров в процессе бурения) и стабилизации бурильного инструмента, производится изменение частоты вращения верхнего привода или нагрузки на долото. При этом, четкого определения динамической составляющей фактической нагрузки на долото *PDC* во время ударов о забой и стенки скважины не существует.

Эмпирические зависимости, определяющие технико-технологические параметры бурения скважин на сегодняшний день не сформированы в единую базу данных (*Big Data*). Причиной является отсутствие корреляционных алгоритмов, позволяющих связать статическую и динамическую составляющие нагрузки на долото. В частности, это касается динамических систем «БК-долото *PDC*».

Недостаточный контроль процесса бурения обусловил необходимость разработки технологии мониторинга виброускорений КНБК путем прогнозирования эффективной нагрузки на долото с учетом ее динамической составляющей.

Во второй главе представлены методы и методология исследования динамической составляющей нагрузки на долото *PDC* в процессе бурения скважин.

С целью определения ударно-вращательного импульса КНБК требуется проведение экспериментальных исследований по установлению диапазона продольных и поперечных деформаций горных пород с разными петрофизическими и физико-механическими свойствами.

Для исследования деформации используются терригенные породы с твердостью от 60 до 170 МПа и другие типы пород по литолого-стратиграфическому разрезу Среднего Приобья и Севера Тюменской области.

Разный тип керна выбирается для последующего прогнозирования ударно-вращательного импульса КНБК по всему интервалу бурящейся скважины.

Представлена методология построения алгоритма связи осевой и боковой вибрации в процессе бурения. Первая часть алгоритма основана на расчете изменения НДС БК, потери ее устойчивости за счет превышения статической нагрузки на долото *PDC* над осевой жесткостью стержня, так и динамической ее составляющей, образующейся в результате крутильных колебаний КНБК и воздействия осевых и латеральных вибраций вследствие разрушения горной породы долотом *PDC*. При этом, возникающий от приложения избыточной осевой нагрузки ударно-вращательный импульс КНБК характеризуется виброускорением, глубиной проникновения резца долота в горную породу и ее резания (скола).

Вторая часть алгоритма включает расчет минимально необходимого для разрушения породы виброускорения для любого значения частоты вращения долота *PDC*. Определенный диапазон минимального виброускорения позволит использовать осевые колебания для повышения механической скорости проходки, при этом энергия будет в наибольшей степени затрачиваться на разрушение породы, а при превышении – появится значительный избыток энергии, ведущий к образованию дополнительных излишних колебаний. В качестве основы для разработки математической модели предлагается использовать гипотезу малости деформации, четвертую теорию прочности и теорию Пальмгрена-Майнера. Энергоэффективность разрушения породы долотом *PDC* достигается, когда значение механической удельной

энергии (MSE) приближается к значению предела прочности на ее одноосное сжатие.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований и анализ разработанного алгоритма.

Результаты экспериментальных исследований продольной и поперечной деформации горных пород представлены на рисунке 1 в таблице 1.

Таблица 1 – Прочностные характеристики горных пород

Наименование породы	Коэффициент Пуассона	Твердость, МПа
Глинистый сланец	0,11	20
Известняк	0,32	50
Алевролит	0,35	107
Гранит	0,27	166
Песчаник алевритистый	0,28	172
Кварц	0,15	216

Из рисунка 1 видно, что для песчаника-алевритистого продольная деформация составляет от 0,28 мм до 0,79 мм и для алевролита – от 0,33 мм до 0,65 мм. Данные показатели деформации горных пород принимаются в качестве параметра – глубины резания при разрушении породы для определения ударно-вращательного импульса КНБК.

Основой разработанной математической модели является определение энергоэффективной нагрузки на долото с учетом ударной составляющей КНБК и деформации горных пород.

Алгоритм расчета включает следующие этапы определения: ударно-вращательного импульса КНБК; времени удара о породу; средней величины ударной реакции; коэффициента разгрузочной способности КНБК; тензора напряжения при разрушении горной породы; эффективной нагрузки на долото; критерия энергоэффективного разрушения породы.

Принципиальная схема для расчета ударно-вращательного импульса КНБК представлена на рисунке 2.

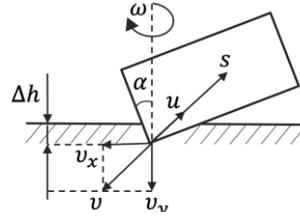


Рисунок 2 – Схема косо́го удара ре́зца PDC долота, где α – угол наклона ре́зца, град.; u – скорость отраженной механической волны, м/с; S – импульс при ударе, Н · с

Ударно-вращательный импульс КНБК определяется по следующей формуле (1):

$$S = m \cdot \sqrt{\left(\omega \frac{D}{4}\right)^2 + 2g\Delta h} \cdot \frac{\rho_{ст} \sqrt{\frac{E_{ст}}{\rho_{ст}}} - \rho_{гп} \sqrt{\frac{E_{гп}}{\rho_{гп}}}}{\rho_{ст} \sqrt{\frac{E_{ст}}{\rho_{ст}}} + \rho_{гп} \sqrt{\frac{E_{гп}}{\rho_{гп}}}}, \quad (1)$$

где m – масса КНБК, кг; ω – частота вращения, рад/с; D – диаметр скважины, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $E_{ст}$, $E_{гп}$ – модуль Юнга стали и горной породы, Па; $\rho_{ст}$, $\rho_{гп}$ – плотность стали и горной породы соответственно, кг/м³; Δh – глубина проникновения ре́зца PDC долота, м.

Время удара t , с определяется следующим выражением (2):

$$t = \frac{\Delta h \cdot c_{ж}}{v}, \quad (2)$$

где $c_{ж}$ – коэффициент относительных упругих свойств материалов; v – механическая скорость проходки, м/с.

Средняя величина ударной реакции N , Н, вычисляется следующим образом (3):

$$N = \frac{S}{t}. \quad (3)$$

Для описания соотношения прикладываемых осевых и поперечных сил введен коэффициент разгрузочной способности КНБК k , представленный как отношение осевой и вращающей энергий. Данный коэффициент определяется отношением осевой энергии E_o к вращающей E_b (4):

$$k = \frac{E_o}{E_b}. \quad (4)$$

При этом, осевая энергия рассчитывается как (5):

$$E_o = F \cdot \Delta h, \quad (5)$$

где F – нагрузка на долото, Н.

Вращающая энергия выражается следующим образом (6):

$$E_B = 2\pi \cdot n \cdot M_d \cdot \Delta h = 2\pi \cdot \frac{\omega}{v} \cdot M \cdot \mu_d \cdot e^{-\mu\gamma} \cdot \Delta h. \quad (6)$$

где n – число оборотов, ед.; M_d – крутящий момент на долоте, Н · м; M – крутящий момент на роторе, Н · м; μ_d – коэффициент трения долота о горную породу; μ – коэффициент трения КНБК о стенки скважин; γ – зенитный угол, рад.

При подстановке уравнений (5) и (6) в (4) получим (7):

$$k = \frac{F}{2\pi \cdot \frac{\omega}{v} \cdot M \cdot \mu_d \cdot e^{-\mu\gamma}}. \quad (7)$$

Исходя из четвертой теории прочности E_0 и E_B формируют соответствующий тензор напряжений (8) σ_1 и σ_3 для расчета эффективной нагрузки на долото *PDC*:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}. \quad (8)$$

σ_1 выражается как (9):

$$\sigma_1 = \frac{E_0}{A_k}, \quad (9)$$

где A_k – площадь контакта резцов долота *PDC*, м² и вычисляется по формуле (10):

$$A_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \quad (10)$$

где D – диаметр скважины, м.

σ_3 рассчитывается следующим образом (11):

$$\sigma_3 = \frac{E_B}{\Delta h \cdot A_k}. \quad (11)$$

Разработана математическая модель, определяющая энергоэффективную нагрузку на долото *PDC* (12), и вычисляется следующим образом:

$$G = \frac{\sigma \cdot A_k}{\sqrt{2\beta} \cdot F}. \quad (12)$$

Откуда поправочный коэффициент β (13) определяется:

$$\beta = 1 + \frac{1}{k} + \frac{1}{k^2}. \quad (13)$$

Для верификации математической модели производится корреляционный анализ при помощи коэффициента корреляции Пирсона по формуле (14):

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{dx_i dy_i}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (14)$$

Для оценки энергоэффективности разрушения породы в процессе бурения рассчитывается полная удельная энергия по (15) и (16):

$$MSE = \frac{E_0 + E_B}{V}, \quad (15)$$

$$MSE = \frac{F}{S_c} + \frac{2\pi \cdot \omega \cdot M}{S_c \cdot v}, \quad (16)$$

где V – объем разрушенной породы, м³; S_c – площадь сечения скважины, м².

На основе лабораторных исследований трехосного сжатия горных пород, данных с датчиков телеметрии и геофизических скважинных автоматизированных систем, предложен алгоритм для прогнозирования ударно-вращательного импульса КНБК и определения энергоэффективной нагрузки на долото при бурении скважин, рисунок 3.

В четвертой главе представлены результаты расчетов по разработанному алгоритму.

На основе промысловых данных на месторождении *Volve* шельфа Северного моря определяется коэффициент разгрузочной способности КНБК k и поправочный коэффициент β для данного литолого-стратиграфического разреза скважины. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

В качестве параметров бурения представлены: нагрузка на долото – от 5 до 140 кН, частота вращения – от 0 до 143 об/мин, крутящий момент – от 2 до 24 кН·м и диаметр скважины в рассматриваемом участке 215,9 мм.

Таблица 2 – Значения коэффициентов в зависимости от типа горной породы

Порода	k , ед.	β , ед.
Глинистый сланец	0,05-0,1	110-170
Известняк	0,03-0,06	300-900
Песчаник	0,04-0,08	170-650
Гранит	0,03-0,05	300-550
Песчаник алевритистый	0,05-0,08	170-420
Кварц	0,06-0,08	170-300

Посредством программы проведен анализ параметров режима бурения в интервале 500-1200 м по стволу. С глубины 950 м происходит смена геологии, глины, суглинки сменяются

песчаниками. Высокие значения MSE характеризуют некорректно подобранный режим бурения. Избыточная энергия способствовала образованию крутильных колебаний БК и КНБК, которые привели к поломке и износу долота на глубине 1009 м скважины F_{9A} .

Для выбора корректных параметров бурения предлагается использовать коэффициенты k и β . Рассмотрен интервал бурения 950-1000 м и определены средние значения коэффициентов.

Рисунке 4 представлены средние значения исходных данных для расчета.

Получим, $k = 0,008$ и $\beta > 1000$.

В месте образования высоких значений MSE , более 2 ГПа, наблюдаются относительно низкие значения осевой нагрузки, менее 30 кН. k составляет 0,008 ед., что является низким значением для песчаника. Из таблицы 2 следует, что k для песчаника варьируется в диапазоне от 0,04 до 0,08 ед. Как правило, значения ниже 0,01 способны провоцировать упругие удары долота о забой. Так, практически вся энергия на разрушение – кинетическая вращающаяся. Таким образом, при недостаточном внедрении резцов долота существует высокая вероятность возникновения крутильных колебаний. В данном случае несоответствие k табличным значениям привело к возникновению осевого и поперечного виброускорения.

Для расчета энергоэффективной нагрузки воспользуемся уравнением (12). С учетом рассчитанных коэффициентов k и β энергоэффективная нагрузка равна 3,4 г.

При этом, глубина резания за один оборот составляет 2,5 мм (рисунок 5 (а)). Исходя из лабораторных экспериментов, при глубине резания менее 2 мм происходит преимущественно пластическая деформация горной породы (рисунок 5 (б)).

На рисунке 6 (а) представлена зависимость осевого виброускорения от нагрузки на долото при ударе долота о породу. Можно заметить, что рекомендуемая нагрузка на долото на интервале 950-1000 м составляет 100-120 кН, когда динамическая нагрузка минимальна. Однако, при бурении данного интервала была выбрана нагрузка 30 кН, что вызвано повышением динамической составляющей нагрузки.

Исходя из рисунков 5 (а) и 6 (а), при рекомендуемой нагрузке в 100-120 кН и частоте вращения более 155 об/мин на интервале 950-1000 м происходит хрупкое разрушение горной породы. При частоте 140 об/мин порода деформируется пластически, что вызывает образование осевого и поперечного виброускорения 15-16 g.

Ударно-вращательный импульс КНБК по (1) равен 2342 Н · с. Время удара по (2) составляет 10^{-2} с. Средняя величина ударной реакции составляет 354,5 кН, что значительно превышает статическую нагрузку на забой 31 кН (рисунок 4), более чем в 11 раз. При корректировке параметров статической нагрузки на долото и частоты вращения достигается стабильное разрушение горной породы на забое.

Результаты верификации математической модели по (15) показали, что достоверность составляет $R^2 = 91,6$ % (рисунок 7).

В пятой главе представлены результаты ОПИ для верификации разработанной математической модели и алгоритма, входящих в состав ПО.

Произведено бурение четвертичных отложений – известняков, на буровой установке *Geomachine Geomatic GM 200 GL* на базе учебно-научного полигона «Нефтяник» Санкт-Петербургского горного университета, пос. Уляновка, г. Санкт-Петербург.

Апробация разработанной математической модели и алгоритма мониторинга и прогнозирования энергоэффективной нагрузки на долото произведена при бурении скважины. На глубине от 12 до 30 м породы представлены плотными известняками с твердостью от 55 до 60 МПа. ОПИ при бурении известняка показали, что при статической нагрузке в 40 кН и частоте вращения 80 об/мин виброускорения КНБК составляют от 18 до 25 g. Средняя механическая скорость проходки – не более 2-4 м/ч. Расчет по предложенной математической модели с учетом известных физико-механических свойств горных пород показал, что ударно-вращательный импульс составляет от 70 до 90 кН. Следовательно, фактическая нагрузка на долото варьируется от 90 до 110 кН. Причем латеральные биения составляют 70 % от общей динамики колебаний КНБК. После проведения соответствующих расчетов нагрузку на долото снизили до 1,5 кН, это обеспечило рост аксиальных

перемещений и снизило латеральные, что обеспечило снижение виброускорения КНБК с 18 до 9 g и увеличило механическую скорость бурения до 8-10 м/ч.

При рекомендуемой нагрузке в 33 кН и частоте вращения долота более 100 об/мин происходит хрупкое разрушение известняка. При частоте вращения менее 90 об/мин порода деформируется пластически, что вызывает образование осевого и поперечного виброускорения порядка 3-4 g.

Ударно-вращательный импульс КНБК с исходной нагрузкой составляет 860 Н·с. Время удара равно 10^{-2} с. Средняя величина ударной реакции составляет 86 кН. При этом удалось достичь увеличения механической скорости бурения с 2-4 м/ч до 8-10 м/ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалифицированной работой, в которой предлагается решение важной и актуальной научно-технической задачи – повышение эффективности бурения скважин разработкой технологии оперативного контроля и управления фактической нагрузкой на долото режуще-скалывающего действия (*PDC*).

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Теоретически обоснована и научно подтверждена необходимость и целесообразность мониторинга и прогнозирования ударно-вращательного импульса КНБК, представляющего основу процесса формирования энергоэффективной нагрузки на долото *PDC* при бурении скважин.

2. На основе экспериментальных исследований физико-механических свойств горных пород с твердостью от 60 до 170 МПа установлен диапазон продольной и поперечной деформации, позволяющий оценить глубину внедрения режущей части вооружения долота *PDC* для оперативного определения ударно-вращательного импульса КНБК и его прогнозирования по литолого-стратиграфическому разрезу скважины.

3. Разработана математическая модель, позволяющая определить эффективную нагрузку на долото режуще-скалывающего действия – *PDC*, представленную введенным коэффициентом

разгрузочной способности КНБК, на основе энергоэффективного разрушения горной породы в зависимости от виброускорения телесистемы и объемных результирующих напряжений в горных породах.

4. На основе предложенного алгоритма определения минимального результирующего виброускорения КНБК и глубины резания горной породы, обеспечивающих создание оптимального ее ударно-вращательного импульса, разработана технология мониторинга и прогнозирования энергоэффективной нагрузки на долото *PDC*.

5. В результате ОПИ, математическая модель и алгоритм мониторинга и прогнозирования энергоэффективной нагрузки на долото подтвердили свою эффективность. Технология контроля и управления динамической нагрузкой на долото позволит увеличить механическую скорость углубления скважин до 20 %.

Определение динамической составляющей нагрузки на долото для бурения шарошечными долотами и продления их моторесурса до уровня времени работы долот *PDC* будет рассмотрены в следующей научной работе.

Перспективами дальнейшего развития темы диссертации следует считать разработку забойного гидромеханического автономного роботизированного комплекса, повышающего эффективность бурения скважин в сложных геолого-технических условиях.

Методология научного исследования будет базироваться на применении программных алгоритмов управления исполнительными механизмами, посредством сенсоров (измерение), приводов (клапан, двигатель) и контроллеров (процессор), работающих на основе прогнозирующих моделей с применением машинного обучения по данным, поступающим с датчиков системы (*IoT*).

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Куншин, А.А.. Повышение эффективности бурения наклонных и горизонтальных скважин / **Куншин А.А.**, Двойников М.В. // Деловой журнал *Neftegaz.RU*. – 2020. – №4. – С.169-171.

2. Буслаев, Г.В. Исследование влияния удельной механической энергии на подбор оптимальных параметров режима бурения / Буслаев Г.В., **Куншин А.А.**, Стариков В.В // Научно-технический журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». – 2020. – №6. – С.10-13.

Публикация в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Dvoynikov, M.V. Development of Mathematical Model for Controlling the Drilling Parameters with a Screw Downhole Motor / Dvoynikov M.V., **Kunshin A.A.**, Blinov P.A., Morozov V.A. // IJE TRANSACTIONS A: Basics. – 2020 – Vol. 33 – № 7. – P. 1423-1430. – DOI: 10.5829/IJE.2020.33.07A.30.

Патент и свидетельства:

4. Свидетельство № 2020616213. Российская Федерация. Программа для определения необходимой нагрузки на долото при бурении скважин с учетом виброускорений КНБК: № 2020612899: заявл. 12.03.2020: опубл. 11.06.2020 / **Куншин А.А.**, Двойников М.В. заявитель СПГУ. – 1 с. – Текст: непосредственный.

5. Свидетельство № 2020615753 Российская Федерация. Программа для определения виброускорения при затухающих осевых колебаниях бурильной колонны: № 2020614864: заявл. 27.05.2020: опубл. 01.06.2020 / **Куншин А.А.**, Двойников М.В., Полянский С.Д.; заявитель СПГУ. – 1 с.

6. Свидетельство № 2021665628. Российская Федерация. Программа прогнозирования возможных осложнений в процессе бурения в режиме реального времени на основе искусственных нейронных сетей и расчёта удельной механической энергии : № 2021664686: заявл. 22.09.2021 : опубл. 30.09.2021 / **Куншин А.А.**, Стариков В.В., Буслаев Г.В. ; заявитель СПГУ. – 1 с.

7. Патент № 2749705. Российская Федерация МПК E21B 17/07 (2006.01). Амортизатор наддолотный: № 2020139107: заявл. 30.11.2020: опубл. 16.06.2021 / **Куншин А.А.**, Сидоров Д.А., Буслаев Г.В., Двойников М.В. заявитель СПГУ. – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.

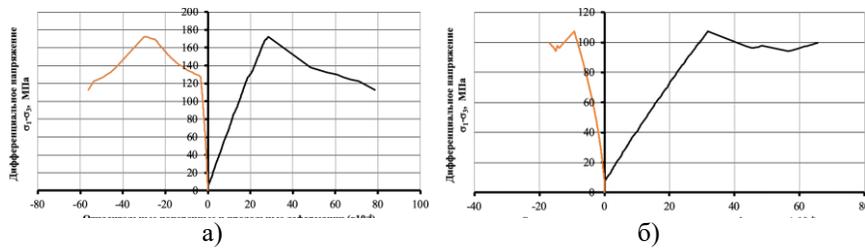


Рисунок 1 – Физико-механические свойства горных пород, а) – песчаник-алевритистый; б) – алевролит



Рисунок 3 – Схема разработанного алгоритма

Интервал, м	950-1000
Параметр	
Нагрузка на долото F, кН	31,0
Диаметр скважины D, мм	215,9
Механическая скорость бурения, м/ч	16,8
Частота вращения ω, об/мин	140,8
Крутящий момент, кН·м	8470,0
Зенитный угол, град.	59,0
Коэффициент трения долота о забой	0,2
Коэффициент трения труб о стенки скважины	0,45
Предел прочности на трехосное сжатие песчаника, МПа	115,0
Плотность песчаника, кг/м ³	2400,0
Плотность стали, кг/м ³	7800,0
Модуль Юнга песчаника, ГПа	25,0
Модуль Юнга стали, ГПа	200,0

Рисунок 4 – Исходные данные для расчета

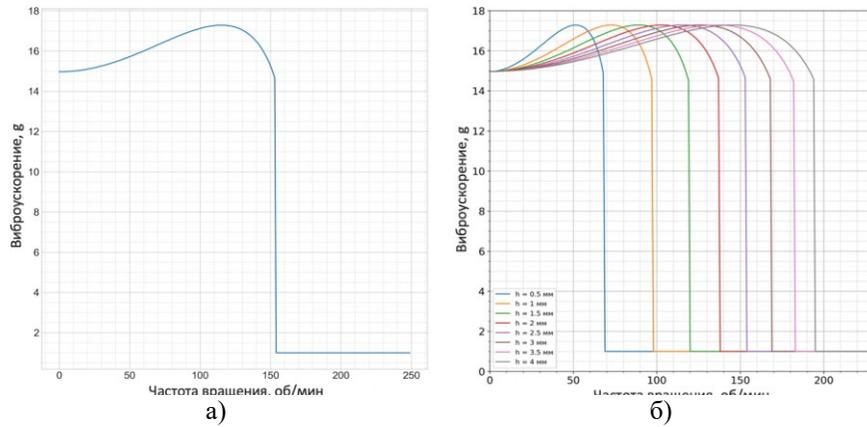


Рисунок 5 – Номограммы, а) – зависимость виброускорения от частоты вращения; б) – зависимость виброускорения от частоты вращения в зависимости от глубины резания

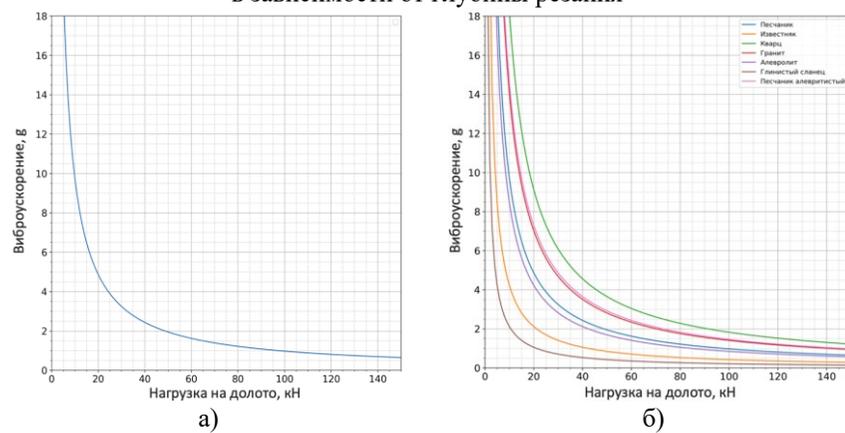


Рисунок 6 – Номограммы, а) – зависимость осевого виброускорения от нагрузки на долото при бурении песчаника; б) – зависимость осевого виброускорения от нагрузки на долото при бурении разных горных пород

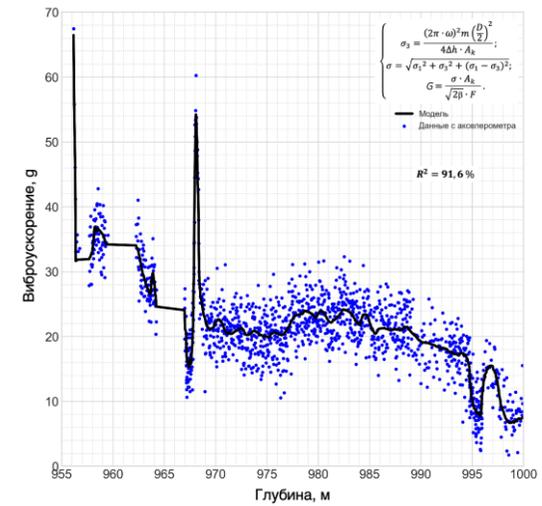


Рисунок 7 – Верификация математической модели