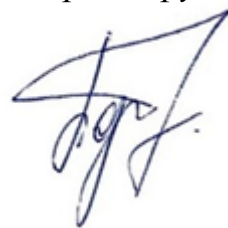


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

На правах рукописи



БОРИСОВ КОНСТАНТИН АНДРЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ
БУРЕНИЯ СКВАЖИН ПУТЕМ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ
АНОМАЛЬНОГО ИЗНОСА РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДОЛОТ PDC**

Специальность 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Научный руководитель:

Третьяк Александр Александрович
доктор технических наук,
доцент, профессор кафедры «Нефтегазовые
техника и технологии»,
ФГБОУ ВО «Южно-Российский
государственный политехнический университет
(НПИ) имени М.И. Платова»
г. Новочеркасск

Официальные оппоненты:

Сериков Дмитрий Юрьевич
доктор технических наук,
доцент кафедры «Управления качеством,
стандартизации и сертификации нефтегазового
оборудования», ФГАОУ ВО «Российский госу-
дарственный университет нефти и газа (нацио-
нальный исследовательский университет)
имени И.М. Губкина»,
г. Москва

Попова Марина Сергеевна
кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры «Технология
и техника разведки месторождений полезных
ископаемых» ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»,
г. Красноярск

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
г. Иркутск.

Защита состоится 24 декабря 2020 г в 13⁰⁰, на заседании диссертационного совета Д 212.121.09 при Российском государственном геологоразведочном университете им. Серго Орджоникидзе.

Адрес: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, ауд. 4-73

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направить ученому секретарю диссертационного совета по указанному выше адресу.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор

Меркулов М.В.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одним из основных средств поисков и разведки полезных ископаемых является бурение скважин, дающее возможность не только обнаружить их, но и вести добычу.

В России одним из основных породоразрушающих инструментов при сооружении скважин являются буровые долота, которыми бурят более 60 % от всего объема геологоразведочного бурения по горным породам от I до XII категории по буримости. К настоящему времени опубликовано огромное количество работ, посвященных конструированию и разработке технологии применения буровых долот, армированных как твердосплавными резцами, так и алмазно-твердосплавными пластинами (PDC – *polycrystalline diamond compact*).

Наибольший вклад в решение этой проблемы внесли: Г.В. Арцимович, Д.Н. Башкатов, Р.К. Богданов, К.И. Борисов, Ю.Е. Будюков, Н.Н. Буренков, В.С. Владиславлев, Б.И. Воздвиженский, С.А. Волков, В.И. Власюк, В.К. Володченко, Л.К. Горшков, А.М. Гусман, Н.Г. Егоров, А.П. Загора, А.М. Исонкин, М.Г. Крапивин, Б.Б. Кудряшов, Н.И. Куличихин, Ю.Ф. Литкевич, В.В. Нескормных, А.И. Осецкий, А.А. Погарский, В.М. Питерский, Б.М. Рябчиков, В.И. Спирин, С.С. Сулакшин, Н.В. Соловьев, Н.И. Сысоев, В.С. Федоров, В.Ф. Чихоткин, Ф.А. Шамшев, Л.А. Шрейнер, Е.Ф. Эпштейн, Х. Вутс, Е. Галле, Д. Ламус, Х. Фулerton, В. Мауэр и др.

В настоящее время объемы бурения скважин долотами режущего типа, армированных пластинами PDC постоянно увеличиваются. Долото, работающее по принципу резания–скалывания, стало базовым инструментом буровой техники, так как из всех механизмов разрушения породы резание является наиболее эффективным, по причине того, что прочность породы на растяжение и скол значительно меньше её прочности на сжатие. В связи с этим работы, направленные на повышение эффективности бурового инструмента, армированного пластинами PDC и, как следствие его конкурентоспособности, являются достаточно актуальными. Успешная работа долот, армированных пластинами PDC, во многом зависит от эффективности его вооружения и разрушающего воздействия на породу, а также качественной работы системы очистки забоя. От совершенства конструкции вооружения долота зависит один из самых важных технических показателей бурового инструмента – механическая скорость бурения и проходка.

Впервые резцы PDC стали известны в конце 70-х годов прошлого века, под зарубежным брендом «*Stratapax*», а позднее, претерпев изменения, получили широкую известность и свое общепринятое название – пластины PDC. Отечественный опыт применения долот, оснащенных пластинами PDC, показал, что данные резцы обладают износостойкостью, в десятки раз, и термостойкостью, в 2 раза превышающими аналогичные характеристики использовавшихся ранее вольфрамокобальтовых твердых сплавов. Долота, армированные пластинами PDC, являются высокоэффективным инструментом для бурения горных пород средней и выше средней категории по буримости (V–IX категории), при разрушении которых резцы самозатачиваются, сохраняя

острые кромки длительное время. При роторном бурении и бурении винтовыми забойными двигателями долота этого типа обеспечивают прирост механической скорости проходки в 2 раза по сравнению с шарошечными долотами, а проходки на долото в 3–7 раз при осевой нагрузке в 2–2,5 раза меньшей и при сопоставимом крутящем моменте.

Актуальность исследований по разработке методических и технологических рекомендаций по повышению эффективности бурения скважин путем предупреждения аномального износа режущих элементов долот армированных пластинами PDC связана с возможностью повышения производительности бурения и снижения стоимости строительства скважин.

Целью диссертационной работы является повышения эффективности бурения скважин долотами, армированными пластинами PDC, за счет разработки и применения методических и технологических решений по снижению вибрационной нагрузки на режущее вооружение.

Основные задачи исследования:

1. Выполнить обзор и анализ известных конструкций буровых долот, армированных пластинами PDC, и различных видов пластин PDC. 2. Выполнить анализ теории разрушения горных пород и механизма износа буровых долот, армированных пластинами PDC. 3. Провести лабораторные исследования механизма нормального и аномального износа режущих пластин PDC. 4. Разработать рекомендаций по технологии бурения долотами, армированных пластинами PDC для предупреждения аномального износа. 5. Разработать рекомендации по конструкциям долот, армированных пластинами PDC предупреждающих аномальный износ.

Идея работы заключается в создании алгоритма прогнозирования нормального износа, а также распознавания и предупреждении аномального износа долот, армированных пластинами PDC, в процессе бурения скважины.

Объектом исследований является породоразрушающий инструмент – буровые долота, армированные пластинами PDC.

Методы научных исследований включают в себя: анализ и обобщение имеющихся теоретических, лабораторных и промысловых материалов по данной проблеме; обработку результатов собственных аналитических и лабораторных исследований; построение эмпирических моделей на основании корреляционного, регрессионного и нейросетевого анализа с использованием современных приборов, установок и вычислительной техники.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость интенсивности нормального изнашивания пластин PDC по высоте в зависимости от технологического режима бурения для пород с известной абразивностью и контактной прочностью, позволяющая прогнозировать наработку и производительность бурения долотами, армированными пластинами PDC.

2. Установлена зависимость, позволяющая прогнозировать возникновение аномального износа пластин PDC в зависимости от толщины срезаемого слоя породы, контактной прочности буримой породы, конструктивных особенностей долота, схемы расстановки вооружения, осевой нагрузки на долото, частоты его вращения и текущего износа пластин PDC.

Научное значение работы заключается в развитии теории функционирования и надежности режущих элементов буровых долот путем использования системного подхода в определении оптимальных значений износостойкости пластин PDC, обоснования научных положений, направленных на разработку методов повышения долговечности породоразрушающего инструмента. В диссертации выполнено теоретическое обобщение и решение научной проблемы по технологии отработки буровых долот, армированных пластинами PDC.

Научные положения выносимые на защиту.

1. Полученные зависимости для определения интенсивности изнашивания режущего вооружения буровых долот PDC, в зависимости от характеристик горной породы целесообразно применять при проектировании буровых работ, и разработке породоразрушающего инструмента.

2. Полученные нейросетевые модели, позволяющие прогнозировать интенсивность аномального изнашивания резцов PDC буровых долот, целесообразно применять при разработке технологии бурения с целью повышения эффективности буровых работ и повышения качества отработки буровых долот.

3. Существенное повышение проходки на долото PDC при бурении горных пород V–IX категории по буримости достигается за счет применения их двухъярусной конструкции в сочетании с усиленным антивибрационным вооружением, обеспечивающих формирование ступенчатого забоя.

Практическая значимость работы заключается в: 1) прогнозировании износа и поломок режущих элементов двухъярусных долот режуще-скалывающего типа в зависимости от конструктивных особенностей долота, схемы расстановки вооружения, осевой нагрузки на долото, частоты его вращения и текущего износа пластин PDC; 2) создании математических моделей для прогнозирования аномального износа резцов PDC; 3) разработке, на уровне изобретения, конструкции долот режуще-скалывающего типа, армированных пластинами PDC; 4) использовании материалов диссертации в учебном процессе кафедры «Нефтегазовая техника и технологии» ЮРГПУ (НПИ) при изучении дисциплин «Технология бурения нефтяных и газовых скважин» и «Строительство нефтяных и газовых скважин в сложных условиях».

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и одобрены на 5-ти международных конференциях: Международной научно-практической конференции «Бурение скважин в осложнённых условиях», Санкт-Петербургский горный университет, 2016; Международной научно-практической конференции «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ)», 2018; III Международной научно-практической конференции «Бурение скважин в осложненных условиях». Санкт-Петербургский горный университет, 2018; Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы недропользования», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2019; Международной научно-

практической конференции «Актуальные вопросы геологии», Старооскольский филиал ФГБОУ ВО МГРИ, 2019.

Публикации. Основные научные положения и результаты диссертационной работы отражены в 22 научных работах, в том числе в 3-х работах, в рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК), 9 работах, входящих в международную базу цитирования SCOPUS, 1 патенте на изобретение.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается необходимым научным обоснованием основных положений и выводов, выполненных в пределах заданной точности; использованием методов системного анализа и математического моделирования при исследовании, формализации и решении поставленных задач, а также анализом результатов; выводы сделанные по результатам работы являются достоверными, основные положения работы обсуждены и прошли апробацию на конференциях.

Личный вклад автора заключается в формулировании и доказательстве основных научных положений, непосредственном участии на всех этапах исследований, получении теоретических и экспериментальных данных, подготовке основных публикаций и внедрении результатов исследований.

При выполнении диссертационных исследований соискателем лично получены следующие результаты:

1. Получены зависимости определения интенсивности изнашивания PDC по высоте от времени при бурении пород средней и выше средней крепости.

2. Разработана методика расчета технологических параметров и их связь с формированием нормального и аномального износа пластин PDC буровых долот, которая обосновывается за счет крутильных колебаний буровой колонны.

3. На основании полученных данных предложены конструкции двухъярусных антивибрационных буровых долот, армированных пластинами PDC.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав, основных выводов и рекомендаций, изложенных на 172 страницах текста в редакторе MS Word, содержит 82 рисунка, 16 таблиц, список использованных источников из 100 наименований и двух приложений.

Работа выполнена на кафедре «Нефтегазовые техника и технологии» ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова и на кафедре «Современные технологии бурения скважин» МГРИ. При подготовке диссертации использованы также материалы экспериментальных исследований, выполненных по госконтракту с Фондом содействия инновациям, программа «Старт-1» по теме: «Разработка и лабораторные испытания образца двухъярусного долота принципиально нового вида» (договор № 3324ГС1/55594 от 16 декабря 2019 г.).

Автор считает своим долгом выразить признательность сотрудникам кафедры «Нефтегазовые техника и технологии» ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, а также сотрудникам кафедры «Современные технологии бурения скважин» МГРИ имени Серго Орджоникидзе за оказанную поддержку и рекомендации при выполнении диссертационной работы.

Содержание работы

Во введении дается общая характеристика выполненной работы, обосновывается ее актуальность, приводится научная новизна и защищаемые положения, даются сведения о личном вкладе автора и апробации работы.

В первой главе дается обзор современного состояния вопроса исследования. Проводится анализ известных конструкций буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами PDC, разновидностей режущих пластин PDC, обозначены цели, задачи, основные вопросы исследования.

Во второй главе описывается разработка теоретических основ прогнозирования износа и поломок режущих пластин PDC и методики расчета наработки долот, описано современное представление о теории разрушения горных пород буровыми долотами, проведено исследование износа и поломок режущих элементов буровых долот, армированных пластинами PDC. Выполнена разработка аппарата регрессионного и нейросетевого моделирования для прогнозирования износа и поломок пластин PDC. На основании выполненных исследований предложены, на уровне изобретений, оптимальные конструкции антивибрационных долот.

Третья глава посвящена разработке рекомендаций по современным конструкциям буровых долот, армированных PDC. Приведен расчет конструктивных параметров режущей части буровых долот.

В четвертой главе приведен расчет экономической эффективности.

В заключении приводятся основные выводы и рекомендации.

Первое защищаемое положение: полученные зависимости для определения интенсивности изнашивания режущего вооружения буровых долот PDC, в зависимости от характеристик горной породы целесообразно, применять при проектировании буровых работ и разработке породоразрушающего инструмента.

Моделирование и прогнозирование износа долот армированных резцами PDC является актуальной задачей. Наибольший износ буровые инструменты получают при проходке высокоабразивных пород V-IX категории по буримости. Существующие методы оценки изнашиваемости резцов PDC, основанные на изучении износа при резании блоков пород в лабораторных условиях для получения достоверных результатов, требуют значительных затрат времени и средств, поэтому целесообразно выбрать такой материал, который удовлетворяет следующим требованиям: большая постоянная абразивность, постоянная твердость и малая трудоёмкость при проведении экспериментов.

Предложен метод исследования износостойкости на установке для ускоренного испытания материалов.

Эксперимент проводили в такой последовательности:

1. Измеряли микрометром высоту H заготовки режущей части долота, армированной пластиной PDC ($H = 35,01$ мм), Износ по высоте (h , мм) определяли микрометром, с точностью до 0,01 мм.

2. Определяли массу установочной части без гирь с заготовкой режущей

части на весах М-ER 326 AFL-32,5 с АКБ с цифровой индикацией и пределом взвешивания 32 кг ($M = 1200$ г).

3. Определяли начальную площадку затупления. За счет фаски на пластине PDC, условная начальная площадка затупления (при $\Delta h = 0,05$ мм) принимается равной $1,25 \text{ мм}^2$ ($F_{\text{зат}}^H = 1,25 \text{ мм}^2$).

4. При допустимой удельной нагрузке на абразивный круг ($P_{\text{уд}} = 18 \text{ МПа}$), определяли начальную осевую нагрузку на PDC

$$P_{\text{ос}}^1 = P_{\text{уд}} \cdot F_{\text{зат}}^1 = 18 \cdot 1,25 = 22,5 \text{ Н.} \quad (1)$$

5. Определяли путь трения $L_{\text{тр}}$ за время t равное 20 минутам при частоте вращения абразивного круга $n = 50$ об/мин и диаметре абразивного круга $D_{\text{АК}} = 0,3$ м.

$$L_{\text{тр}}^{\text{АК}} = \pi \cdot D_{\text{АК}} \cdot n \cdot t = \pi \cdot 0,3 \cdot 50 \cdot 20 = 942 \text{ м.} \quad (2)$$

6. Измеряли микрометром высоту H_1 после истирания и определяли износ по высоте Δh , мм

$$\Delta h = H - H_1 = 35,01 - 34,89 = 0,12 \text{ мм,} \quad (3)$$

где $H_1 = 34,89$ мм – высота образца после истирания.

7. Определяли новое значение площадки затупления, зависящей от толщины режущей алмазной части F , ее ширины B , и износа по высоте Δh для пластины PDC радиусом 6,75 мм.

$$F_{\text{зат}} = (F \cdot B) = F \cdot 2\sqrt{2Rh - h^2} = 2\sqrt{6,75 \cdot 2 \cdot 0,12 - 0,01} = 2,83 \text{ мм}^2. \quad (4)$$

8. Определяли конечное и среднее значение удельной нагрузки на пластины PDC в процессе эксперимента

$$P_{\text{уд}}^{\text{к}} = \frac{P_{\text{ос}}^1}{F_{\text{зат}}} = \frac{22,5}{2,83} = 8 \text{ МПа} - \text{конечное значение удельной нагрузки;} \quad (5)$$

$$P_{\text{уд}}^{\text{ср}} = \frac{P_{\text{уд}}^1 + P_{\text{уд}}^{\text{к}}}{2} = \frac{18 + 8}{2} = 13 \text{ МПа} - \text{среднее значение удельной нагрузки.} \quad (6)$$

9. Определяли интенсивность износа пластин PDC на абразивном круге по высоте от пройденного пути за время эксперимента:

$$i_{h(L)}^{\text{АК}} = \frac{\Delta h_1}{L_{\text{тр}}} = \frac{0,12}{942} = 0,127 \cdot 10^{-3} \text{ мм/м} \quad (7)$$

При продолжительности опыта $t = 20$ мин, при частоте вращения абразивного круга $n = 50$ об/мин путь трения при начальной удельной нагрузке $P_{\text{уд}} = 18 \text{ МПа}$ составляет:

$$L_{\text{тр}} = \pi \cdot D_{\text{АК}} \cdot n \cdot t = \pi \cdot 300 \cdot 50 \cdot 20 = 942 \text{ м.} \quad (8)$$

10. Повторно устанавливали образец на установку для ускоренного испытания материалов.

11. Зная площадку затупления $F_{\text{зат}}^2$ определяли начальную осевую нагрузку второго эксперимента.

$$P_{\text{ос}}^2 = P_{\text{уд}} \cdot F_{\text{зат}}^2 = 18 \cdot 2,83 = 51 \text{ Н.} \quad (9)$$

Среднее значение интенсивности изнашивания по высоте на абразивном круге по семи замерам составляет $i_{h(L)}^{\text{АК}} = 0,107 \cdot 10^{-3} \text{ мм/м}$ при коэффициенте вариации $K_{\text{вар}} = 10,8 \%$ (табл. 1).

Таблица 1

Результаты экспериментальных замеров

№ п/п	Параметр	Номер опыта						
		1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Начальная удельная нагрузка $P_{уд}^{нач}$, МПа	18	18	18	18	18	18	18
2	Начальная осевая нагрузка $P_{ос}^{нач}$, Н	22,5	51,0	65,5	77,2	87,3	96,1	104
3	Начальная площадка затупления $F_{зат}^{нач}$, мм ²	1,25	2,83	3,64	4,29	4,85	5,34	5,78
4	Время эксперимента t , мин	20	20	20	20	20	20	20
5	Размер образца по высоте после истирания H_1 , мм	34,89	34,78	34,67	34,57	34,48	34,39	34,30
6	Износ образца по высоте Δh , мм	0,12	0,11	0,105	0,1	0,095	0,092	0,09
7	Конечная площадка затупления $F_{зат}^{кон}$, мм ²	2,83	3,64	4,29	4,85	5,34	5,78	6,18
8	Конечное значение удельной нагрузки $P_{уд}^{кон}$, МПа	8	14	15,3	15,9	16,35	16,63	16,83
9	Среднее значение удельной нагрузки $P_{уд}^{ср}$, МПа	13	16	16,6	16,9	17,2	17,3	17,4
10	Интенсивность износа по высоте $i_{h(L)} \cdot 10^{-3}$ мм/м	0,127	0,116	0,111	0,106	0,100	0,095	0,095

В лабораторных условиях исследовать износостойкость пластин PDC на горных породах нет никакой возможности из-за значительных объёмов эксперимента, поэтому сравнение результатов исследований износостойкости на абразивных кругах и на породе проведены косвенным методом по результатам износа инструмента с пластинами PDC при бурении скважины глубиной 85,2 м за время 3 часа 50 минут.

За весь период испытаний (7 замеров до замены круга) общий путь трения с учетом уменьшения диаметра абразивного круга составил $\sum_1^7 L_{тр} = 6500$ м, а износ пластин PDC по высоте составил $\Delta h = 0,7$ мм. Такой износ пластин PDC произошел при бурении скважины глубиной 85,2 метра долотом диаметром $d=0,112$ м при частоте вращения $n=250$ об/мин через $t = 3,8$ часа (230 минут). При этом путь трения (резания) по породе режущим элементом составил:

$$L_{тр} = \pi \cdot d \cdot n \cdot t = 3,14 \cdot 0,112 \cdot 250 \cdot 230 \approx 20220 \text{ м}, \quad (10)$$

Износостойкость режущих элементов (I_{PDC}) определяется как отношение износа пластин PDC по высоте к пути резания за время эксперимента. Тогда износостойкость пластин PDC при испытании на абразивном круге будет:

$$I_{PDC}^{AK} = \frac{\Delta h_{PDC}^{AK}}{\sum_1^7 L_{тр}^{AK}} = \frac{0,7}{6500} = 0,107 \cdot 10^{-3} \text{ мм/м}, \quad (11)$$

где $\sum_1^7 L_{\text{тр}}^{AK}$ – путь истирания PDC на абразивном круге за всё время эксперимента;
 $\Delta h_{PDC}^{AK} = 0,7$ мм – суммарный износ пластин PDC по высоте.

Износостойкость пластин PDC на породе это отношение износа пластин PDC по высоте к пути резания за время наблюдения:

$$I_{PDC}^n = \frac{\Delta h_{PDC}^n}{L_{\text{рез}}^n} = \frac{0,7}{20220} = 0,035 \cdot 10^{-3} \text{ мм/м}, \quad (12)$$

Для практических расчетов важно знать интенсивность износа пластин PDC по высоте от пути трения по горной породе:

$$i_{h(L)PDC}^n = i_{h(L)PDC}^{AK} \cdot \left(\frac{a_n}{a_{AK}} \right)^{0,3}, \text{ мм/м}; \quad (13)$$

где a_n – абразивность породы, мг; a_{AK} – абразивность круга, мг.

Зная $i_{h(L)PDC}^n$ и допустимый износ бурового инструмента по диаметру $\Delta D = 2h$, определяют время $t_{\text{Нап}}$ работы инструмента по формуле:

$$t_{\text{Нап}} = \frac{\Delta D}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot n \cdot i_{h(L)PDC}^n}, \text{ мин} \quad (14)$$

где d – диаметр долота, м; n – частота вращения долота, об/мин.

Максимальное значение площадки затупления одного режущего элемента зависит от толщины режущей алмазной части F , ее ширины B_{max} , при максимальном допустимом износе по высоте Δh_{max} для пластины PDC радиусом 6,75 мм и определяется по формуле:

$$F_{\text{зат}}^{\text{max}} = F \cdot B_{\text{max}} = F_{\text{max}} \cdot 2 \sqrt{2R \Delta h_{\text{max}} - \Delta h_{\text{max}}^2}, \text{ мм}^2 \quad (15)$$

Затем составляется регламент бурения с циклическим увеличением осевой нагрузки $P_{\text{ос}}$ на каждом интервале: забуривание; приработка нового инструмента; наращивание нагрузки по мере увеличения $F_{\text{зат}}$; наращивание $P_{\text{ос}}$ нагрузки до предельного значения. При определении наработки породоразрушающего инструмента основным условием является выбор режима, при котором удельная нагрузка ($P_{\text{уд}}$) всегда больше предельной контактной нагрузки ($P_{\text{к}}$) (режим объемного разрушения), где $P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{ос}}}{F_{\text{зат}}}$. Рассчитывая скорость бурения на каждом интервале определяют среднюю скорость бурения за время t , по формуле:

$$V_{\text{мб}} = V_0 \frac{P_{\text{уд}}}{P_{\text{к}}}, \text{ мм/с} \quad (16)$$

Тогда наработка долота $L_{\text{Нап}}$ определяется выражением:

$$L_{\text{Нап}} = V_{\text{мб}}^{\text{ср}} \cdot t_{\text{Нап}}, \text{ м} \quad (17)$$

Усилия резаний и необходимые значения крутящих моментов зависят от толщины срезаемого слоя породы. Толщина срезаемого слоя породы зависит от свойств породы, конструкции долота и режимных параметров процесса бурения

$$h = \frac{V_{\text{мб}}}{n \cdot z}, \text{ мм} \quad (18)$$

где n – частота вращения долота, об/с; z – количество режущих пластин PDC в

линии резания; $V_{мб} = V_0 \frac{P_{уд}}{P_k}$, мм/с – механическая скорость бурения; V_0 – модуль скорости бурения, мм/с; $P_{уд} = \frac{P_{ос}}{F_{зат}}$, МПа – удельная нагрузка на режущих кромках долота; $P_{ос}$ – осевая нагрузка, кН; $F_{зат}$ – площадка затупления режущих пластин PDC, мм², тогда:

$$V_{мб} = \frac{V_0 \cdot P_{ос}}{P_k \cdot F_{зат}}, \text{ мм/с} \quad (19)$$

Подставляя значение $V_{мб}$ в формулу (18), получим:

$$h = \frac{V_0 \cdot P_{ос} \cdot 60}{n \cdot z \cdot P_k \cdot F_{зат}}, \text{ мм} \quad (20)$$

или для требуемого значения толщины срезаемого слоя породы необходимая осевая нагрузка определяется по формуле:

$$P_{ос} = \frac{h \cdot n \cdot z \cdot P_k \cdot F_{зат}}{V_0 \cdot 60}, \text{ кН.} \quad (21)$$

Зная h , усилие резания при бурении определяют по формуле:

$$P_z = \mu_c \cdot R_d \cdot F_{зат} + \frac{R_{ск} \cdot h \cdot B(\sin\delta + \mu_1 \cdot \cos\delta)}{2\sin\tau \cdot \sin(\tau + \delta)}, \text{ кН}$$

где $R_d = 0,24 \cdot P_k$ – сопротивление породы дроблению; $R_{ск} = 0,08 \cdot P_k$ – сопротивление породы скалыванию; $\mu_c = 0,35$ – коэффициент трения при дроблении; $\mu_1 = 0,4$ – коэффициент трения при скалывании; $\tau = 25^\circ$ – угол скалывания пород; $\delta = 105^\circ$ – угол резания (при $\beta = -15^\circ$ – передний угол); $B = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (R - h)^2}$, мм – ширина срезаемого слоя породы при толщине слоя h (мм); $R = 6,75$ мм радиус круглой пластины PDC.

При взаимодействии пластин PDC с забоем скважины режущие элементы воздействуют на забой с усилием P_y равным:

$$P_y = R_d \cdot F_{зат} - \frac{R_{ск} \cdot h \cdot z(\cos\delta - \mu_1 \cdot \sin\delta)}{2\sin\tau \cdot \sin(\tau + \delta)}, \quad (22)$$

где $F_{зат}$ – площадка затупления, мм²; h – толщина срезаемого слоя, мм; z – радиус установки режущего элемента, мм; δ° – угол резания, град; τ° – угол скалывания, град.

Второе защищаемое положение: полученные нейросетевые модели, позволяющие прогнозировать интенсивность аномального изнашивания резцов PDC буровых долот целесообразно применять при разработке технологии бурения с целью повышения эффективности буровых работ и повышения качества отработки буровых долот.

Известно, что на каждом из отработанных долот количество нормально и аномально изношенных режущих элементов примерно одинаково. Анализ состояния отработанных долот показывает, что пластины PDC имеют преимущественно два вида аномального износа (рис. 2): 1 – сколы от действия сил со стороны передней грани, 2 – сколы от действия сил со стороны задней грани, так же возможен отрыв всей пластины PDC – 3.

Прочностные характеристики режущих элементов значительно превышают прочностные характеристики буримых пород. Так у твердосплавной основы PDC твердость 86–91 HRA, прочность на изгиб 1000–1800 МПа, ударная вязкость 2–7 Дж/см², модуль упругости $6 \cdot 10^5$ МПа, у алмазного слоя предел прочности при сжатии 2000 МПа. Следовательно, аномальный износ может происходить только от действия ударных нагрузок.

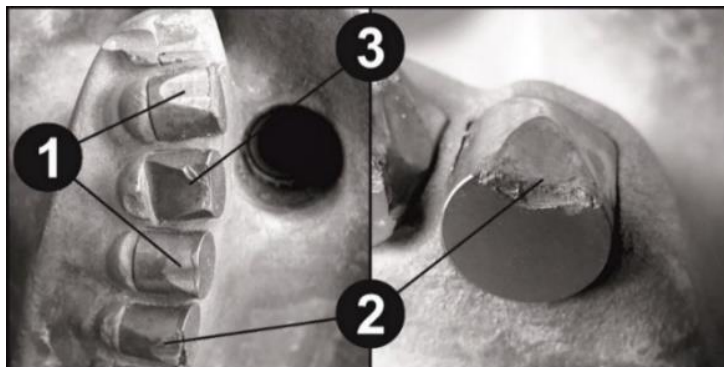


Рис. 2. Фрагменты долота с изношенными и сломанными PDC:

1 – изношенные PDC; 2 – скол PDC от действия сил по передней грани; 3 – скол PDC от действия сил по задней грани

В момент формирования ударного импульса на режущем элементе (рис. 3) от крутильной волны пластина PDC может находиться в начале, середине или конце участка дробления и скола породы.

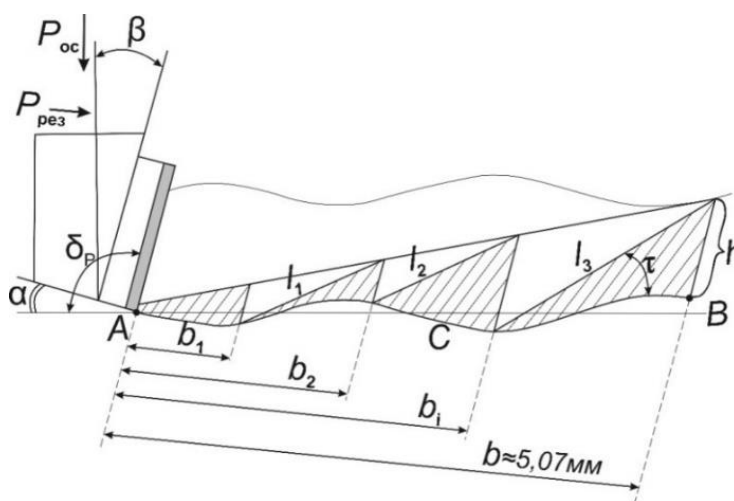


Рис. 3. Расчетная схема разрушения горной породы режущим элементом долота:

$P_{ос}$ и $P_{рез}$ – направление действия осевой нагрузки и силы резания; $h = 2$ мм – текущая величина толщины срезаемого слоя породы; b_i и l_i – размеры участков дробления и скола; τ – угол скола i -го элемента; β – передний угол; δ_p – угол резания; α – задний угол; A и B – точки начала и конца крупного скола; A, B, C – точки возможного положения режущей кромки PDC при воздействии на нее импульса скорости от крутильной волны

Длина скола b_i и длина пути S_{PDC} за время импульса ($t \approx 0,005$ с) соизмеримы. Если в момент формирования импульса пластина PDC находится в начале участка дробления и скола породы, то из-за нехватки материала ядро уплотнения не формируется. Если же в момент формирования импульса пластина PDC находится в конце участка дробления и скола, то ядро формируется в полном объеме и производит на пластину PDC ударный импульс.

За время t энергия удара гасится при формировании ядра уплотнения и на пластине PDC воздействует неупругий удар, определяемый по формуле:

$$E = \frac{\omega}{t}, \text{ Дж} \quad (23)$$

где: ω – энергия, передаваемая в породу Дж/мс.

Вероятность такого события определяется по формуле Байеса. Пусть событие В-ударный импульс, происходит с одним из сколов несовместных событий: A_1, A_2, A_3 , где A_1 – встреча импульса с началом скола (рис. 3, точка А), A_2 – встреча импульса с серединой скола (рис. 3, точка С), A_3 – встреча импульса с окончанием скола (рис. 3, точка В).

При толщине срезаемого слоя породы $h = 1,5\text{--}2$ мм среднее значение длины скола $l = 5,07$ мм, тогда вероятность события $P(A_1) = 1/5 = 0,2$; $P(A_2) = 3/5 = 0,6$; $P(A_3) = 1/5 = 0,2$. Вероятность события $P(B/A_1) = 0,8$; $P(B/A_2) = 0,9$; $P(B/A_3) = 0,85$.

Тогда по формуле полной вероятности встречи импульса со сколом $P(B) = P(B/A_1) \cdot P(A_1) + P(B/A_2) \cdot P(A_2) + P(B/A_3) \cdot P(A_3) = 0,87$.

По формуле Байеса находим вероятность возникновения ударного импульса в зоне точки В (рис. 3):

$$P(A_3/B) = \frac{P(A_3) \cdot P(B/A_3)}{P(B)} = \frac{0,2 \cdot 0,85}{0,87} = 0,19; \quad P(A_3/B) \leq 0,2.$$

И хотя вероятность встречи импульса с началом крупного скола (формирование удара) не высока (менее 20 %) число поломок пластин PDC на отработанных долотах и нормально изношенных пластин PDC примерно одинаково.

Исследование проводилось на стенде, оборудованном на базе гидравлического пресса и копра радиусом $R_k = 1$ м, в лаборатории воспроизводилась та часть энергии удара, которая воздействует на пластины PDC в конце импульса, когда уже сформировалось ядро уплотнения. Исследование возникновения поломок при бурении крепких известняков с $P_k = 960$ МПа и абразивностью $a = 18$ мг. Моделировали бурение с толщиной срезаемого слоя породы $h_{\text{мм}}$. $h = 1,0$ мм; $h = 1,2$ мм; $h = 1,5$ мм; $h = 2,0$ мм. По известной методике, зная горно-технологические характеристики породы, определяли для каждого значения $h_{\text{мм}}$, осевую нагрузку $P_{\text{ос}}$ и усилие резания P_z

$$P_{\text{ос}} = \frac{P_k \cdot F_{\text{зат}} \cdot h \cdot n \cdot Z}{V_0 \cdot 60}, \text{ кН} \quad (24)$$

где P_k – контактная прочность, МПа, $F_{\text{зат}}$ – начальная площадка затупления, мм², h – толщина срезаемого слоя породы, мм, n – частота вращения долота, об/мин, Z – число режущих элементов в линии резания, V_0 – модуль скорости бурения, мм/с.

Усилие резания при бурении крепких пород находится в пределах $P_z = (0,25 - 0,3) \cdot P_{\text{ос}}$. Полученные результаты исследования поломок режущих элементов PDC представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследования поломок режущих элементов PDC

№ п/п	Исследуемый параметр	Характеристика породы: Крепкий известняк, $P_k = 960$ МПа; $a = 18$ мг			
		Толщина срезаемого слоя породы h , мм			
		1,0	1,2	1,5	2,0
1	Осевая нагрузка P_{oc} , Н	2040	2450	3060	4080
2	Усилие резания P_z , Н	510	613	766	1020
3	Скорость резания $V_{рез}$ м/с	1,35	1,35	1,35	1,35
4	Скорость импульса крутильной волны V , м/с	245	245	245	245
5	Масса гири копра G , кг	2,5	3,0	3,76	5,0
6	Энергия неупругого удара, $\omega_{сж}$, Дж	25	30	37,6	50
7	Площадь поверхности скола резца PDC, $S_{ск}$, мм ²	20	25,5	31	36,5
8	Напряжение сжатия на поверхности скола $\zeta_{сж}$, МПа	102	96	99	111,8
9	Ударная вязкость со сжатием d_n , Дж/см ²	125	117	121,3	137

После нагружения фрагмента долота с PDC за счет P_{oc} и P_z наносился удар гирями копра. После образования скола PDC измерял площадь поверхности скола $S_{ск}$ (мм²), находили напряжение сжатия на поверхности скола $\zeta_{сж} = P_{oc}/S_{ск}$ (МПа), затем вычисляли «ударную вязкость со сжатием» d_n , Дж/см².

Таким образом, выполненные лабораторные исследования по износу и поломкам пластин PDC позволили выполнять расчеты основных технологических параметров.

Таким образом исследование аномального износа пластин PDC показывает, что крутильные колебания бурового става формирующие ударную нагрузку на режущие элементы бурового долота могут приводить к образованию крупных и мелких сколов PDC. И хотя вероятность формирования удара на PDC не высока (менее 20 %) $P \leq 0,2$ анализ отработанных долот показывает, что число аномально и нормально изношенных режущих PDC на долоте примерно одинаково.

Аномальный износ резцов PDC в процессе бурения скважин был всегда и от него невозможно избавиться полностью, но подбирая верное сочетание значений осевой нагрузки и числа оборотов инструмента, при этом получая максимальную механическую скорость бурения как определяющий фактор, решим задачу минимизации аномального износа резцов PDC.

Учитывая вышесказанное, а также то, что механическая скорость бурения является определяющим фактором при выбраковке резцов PDC, предложена модель, состоящую из двух последовательно соединённых сетей:

$$\{P, N\} \rightarrow \{NN: 10 \cdot 5\} \rightarrow \{V^*\}; \quad (25)$$

$$\{P, N, V^*\} \rightarrow \{NN: 10 \cdot 5\} \rightarrow \{Prpol\} \quad (26)$$

Первая нейронная сеть ансамбля вычисляет значение скорости бурения V^* , вторая сеть использует полученную скорость в совокупности с осевой нагрузкой и частотой оборотов долота для вычисления процента поломок (рис. 4).

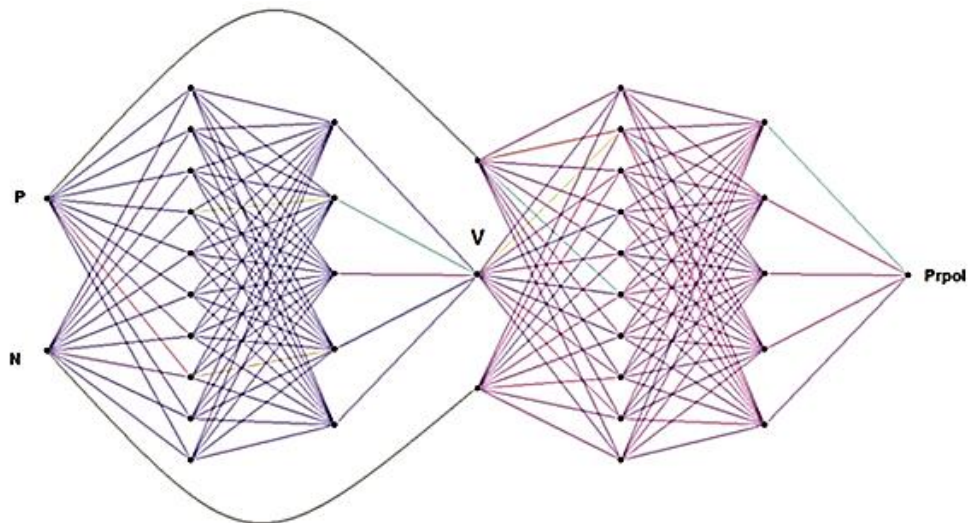


Рис. 4. Ансамбль нейронных сетей

С целью решения вопросов минимизации поломок резцов PDC были использованы нейросетевые модели. Реакция сети (процент поломок) при скорости вращения 310 об/мин показана на рисунке 5.

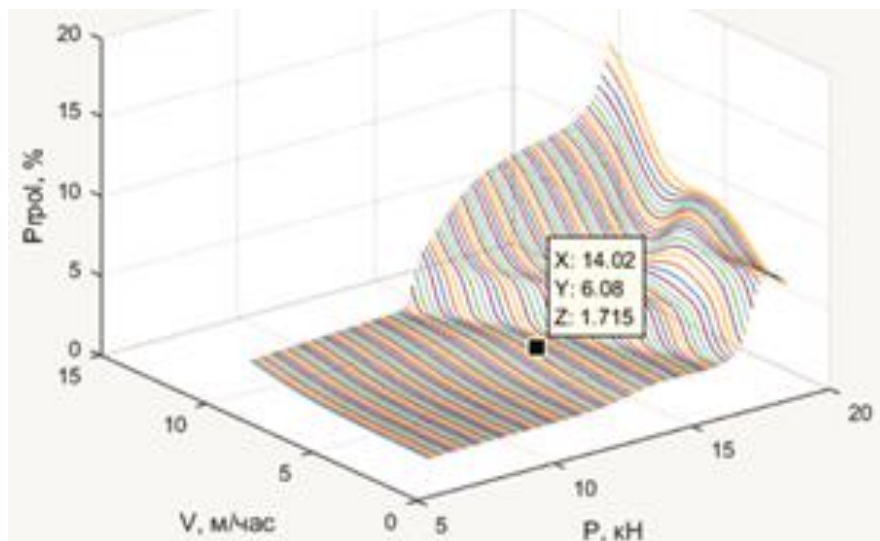


Рис. 5. Реакция сети (процент поломок) при скорости вращения 310 об/мин

Результаты, полученные с помощью комплексной нейросетевой модели с использованием полевых данных отработки долот, армированных PDC, показали её пригодность и возможность дальнейшего развития путем учёта дополнительных параметров режима бурения и уточнения уже использованной входной информации.

Предложенная нейросетевая модель и её последующие модификации могут найти широкое применение при разработке технологического регламента отработки долот, армированных резцами PDC и при оперативном учете основных параметров бурения в системе геолого-технологических исследований

Использование нейросетевых моделей для целей оптимизации техники и технологии сооружения скважин на нефть и газ в настоящее время востребовано производителями и требует дальнейшего совершенствования.

Третье защищаемое положение: существенное повышение проходки на долото PDC при бурении горных пород V-IX категории по буримости достигается за счет применения их двухъярусной конструкции и усиленного антивибрационного вооружения, обеспечивающих формирование ступенчатого забоя.

Анализ конструкций долот показывает, что при создании породоразрушающего инструмента часто не учитывают функционально взаимосвязанную систему трех основных составляющих, влияющих на эффективность взаимодействия пары «инструмент-порода». Под основными составляющими функционально взаимосвязанной системы следует понимать конструктивное, структурное и технологическое решение по изготовлению и применению инструмента.

Известно двухъярусное долото режущего типа с встречным вращением ярусов и с планетарным редуктором. Оно разделено на ярусы, выполненные в виде независимых тел вращения и расположенные соосно. Забуривающий ярус, вращается вправо с угловой скоростью ω_1 , получая привод от забойного двигателя через центральный вал редуктора. В редукторе находятся центральное колесо редуктора и зубчатый венец, за счет чего разбуривающий ярус вращается с угловой скоростью ω_2 , получая привод от водила через вращающиеся сателлиты планетарного редуктора.

Если оси вращающихся сателлитов закреплены в неподвижном корпусе планетарного редуктора, то разбуривающий ярус вращается влево с меньшей частотой. Если же оси вращающихся сателлитов закрепить во вращающейся части редуктора, то ярусы долота будут вращаться попутно (вправо) с различной частотой.

Достоинством данного изобретения является то, что режущие элементы забуривающего и разбуривающего ярусов изнашиваются с одинаковой интенсивностью, за счет чего увеличивается общая наработка на долото.

Недостатком же его является высокие значения аномального износа пластин PDC возникающие за счет того, что крутящий момент на забуривающем и разбуривающем ярусах не уравновешены и приводят к возникновению крутильных колебаний при бурении горных пород V-IX категории по буримости и переслаивающихся горных пород.

На основании проведенных экспериментальных исследований было разработано стабилизирующее двухъярусное долото режуще-скалывающего типа (рис.6), на конструкцию которого получен патент на изобретение (RU № 2695726).

Техническим результатом изобретения является уменьшение крутящего момента на буровом ставе и предупреждение возможности возникновения крутильных колебаний при бурении, вызывающих поломки режущих элементов. Для предупреждения возникновения крутильных колебаний необходимо освободить буровую колонну от передачи крутящего момента от долота.

Это возможно если суммарные крутящие моменты на режущих элементах нижнего забуривающего и верхнего разбуривающего ярусов будут равны по модулю, но противоположно направлены. Приближая по модулю значения

крутящих моментов на забуривающем и разбуривающем ярусах, можно предупредить возникновение крутильных колебаний буровой колонны и уменьшить количество поломок пластин PDC от ударов.

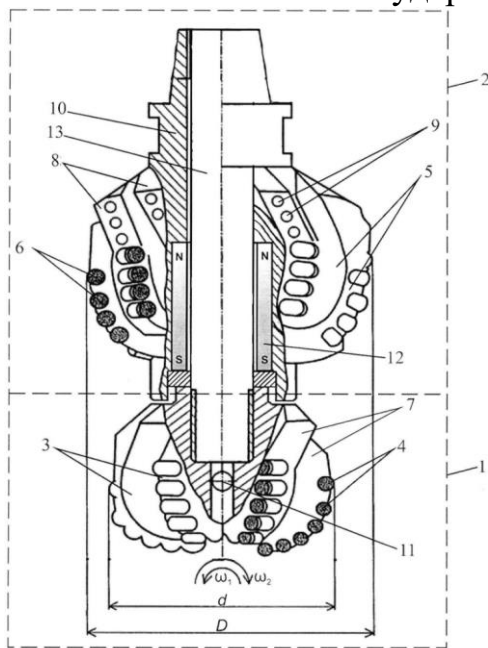


Рис. 6. Стабилизирующее двухъярусное долото режуще-скалывающего типа
1 – забуривающий ярус, 2 – разбуривающий ярус, 3,5 – режущие лопасти, 4,6 – режущие пластины PDC, 7,8 – стабилизаторы, 9 - высокостойкие штыри, 10 – хвостовик, 11 – промывочное отверстие, 12 – постоянный магнит, 13 – внутренний канал долота

Задачей разработки антивибрационного двухъярусного долота является увеличение наработки на долото по перемежающимся горным породам от V до IX категории по буримости при сохранении вертикальности ствола скважины, а также уменьшение степени вибрации на забое. Данная задача решается за счет того, что антивибрационное двухъярусное долото армировано PDC-резцами плоской и конусообразной формы, а лопасти верхнего и нижнего ярусов долота расположены под углом от 15 до 20° и расположены по прямой линии к продольной оси долота.

Сущность изобретения поясняется на рис. 7, где представлено: антивибрационное двухъярусное долото, включающее нижний забуривающий ярус 1, включающий стабилизаторы 7 нижнего забуривающего яруса 1 и режущие лопасти 3 нижнего забуривающего яруса 1, верхний разбуривающий ярус 2, включающий хвостовик 10, внутренний канал долота 13, стабилизаторы 8 верхнего разбуривающего яруса 2 и режущие лопасти 5 верхнего разбуривающего яруса 2, режущие лопасти 3 нижнего забуривающего яруса 1 и режущие лопасти 5 верхнего разбуривающего яруса 2 выполнены симметрично с радиально расположенными режущими элементами 4 нижнего забуривающего яруса 1 и режущими элементами 6 верхнего разбуривающего яруса 2, стабилизаторы 7 нижнего забуривающего яруса 1 и стабилизаторы 8 верхнего разбуривающего яруса 2 представляют собой цилиндрические калибрующие поверхности, стабилизаторы 8 верхнего разбуривающего яруса 2 оснащены высокостойкими штырями 9, обладающими калибрующим действием, промывочные отверстия 11 расположены в нижнем забуривающем ярусе 1 долота.

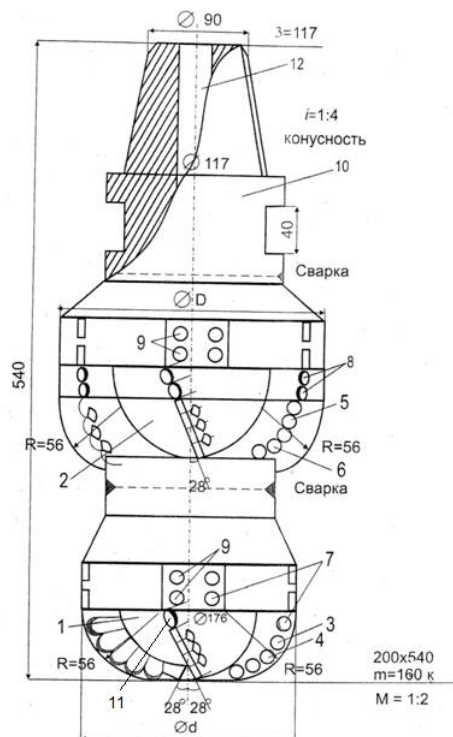


Рис. 7. Антивибрационное двухъярусное долото, армированное пластинами PDC

Применение резцов PDC конусообразной формы, выполняющих роль амортизаторов, значительно повышают ударную прочность долота и скорость проходки. Конусообразная форма резца PDC повышает эффективность режущей силы и теплоотдачу при более высоком сопротивлении фронтальным нагрузкам на резец, что обеспечивает более эффективную работу его по сравнению с стандартным резцом PDC.

Антивибрационное двухъярусное долото, отличающееся от известных тем, что с целью гашения вибрации от крутильных и продольных колебаний долота, вызывающих поломки резцов, за режущими резцами PDC с плоской передней гранью установлен второй ряд резцов PDC с выпуклой конусообразной формой, расположенных в линиях резания между плоскими резцами PDC, а промывочные отверстия или насадки расположены строго под прямым углом в сторону к лопастям на которых расположены режущие элементы PDC.

В ходе предварительного моделирования породоразрушающего инструмента при помощи программы «Solid Works» нами были выявлены серьезные преимущества, которые в теоретическом плане дает данная конструкция долота. Одним из основных можно выделить уменьшение крутящего момента на буровой колонне и предупреждение возможности возникновения крутильных колебаний при бурении, вызывающих поломки режущих элементов. Дополнительно данная проблема решается за счет двухопорности долота. Колебания, возникающие на нижнем ярусе, будут гаситься верхним разбуривающим ярусом.

С учетом вышеизложенного и с целью определения оптимальных геометрических параметров PDC-резца, а также прогноза степени износа были выполнены исследования с использованием программного конечно-элементного комплекса Abaqus Explicit (рис. 8).

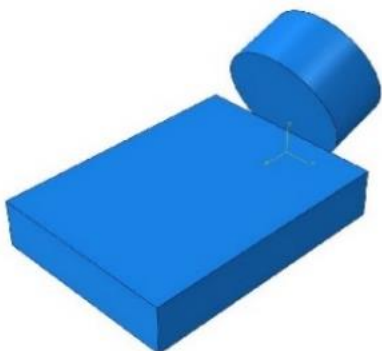
1. Создание 3D CAD-сборки PDC-резца и участка породы. Ориентация положения резца в пространстве 	2. Определение контактного взаимодействия посредством изотропной модели трения Кулона (кинематический коэффициент трения для пары PDC-резец / порода) 
3. Определение параметров конечно-элементной сетки. Для PDC-резца: свободные тетраэдральные элементы размером 0,5 мм (125571 элементов) Для породы: структурированные гексагональные размером 0,2 мм (1200000 элементов) Тип элементов – 3D Stress, работающие во всех трех направлениях по своему объему в гибридной формулировке.	4. Наложение граничных условий в формулировке Лагранжа. Основание и боковые стенки участка породы лишаются всех степеней свободы. Для PDC-резца задаётся скорость резания в направлении одной из осей. По другим осям перемещение не авторизовано
5. Расчёт модели выполняется в модуле, предназначенном для нелинейных переходных динамических процессов, использующих явную схему интегрирования метода конечных элементов. Время процесса имитации – 0,015 с. Время расчета – 5 часов.	6. Практическое применение модели: – оптимизация геометрических параметров PDC-резца, контактного взаимодействия и режимов резания в зависимости от распределения контактных напряжений и свойств породы; – прогнозирование степени износа PDC-резца на основе регрессионных моделей, полученных имитационно-экспериментальным методом.

Рис. 8. Алгоритм создания динамической модели взаимодействия бурового инструмента и породы в Abaqus Explicit

Выполненные исследования позволили получить зависимости определения интенсивности изнашивания пластин PDC по высоте, по времени при бурении пород средней и выше средней крепости, а также установить закономерность, которая позволила определить, что при бурении пород средней и выше средней крепости долотами режуще-скалывающего типа, армированными пластинами PDC, при одинаковой толщине срезаемого слоя породы, необходимая величина осевой нагрузки изменяется прямо пропорционально изменению частоты вращения долота.

Стендовые испытания долот, армированных резцами PDC конусной формы, позволили достичь увеличения механической скорости проходки по сравнению с долотами, армированными стандартными PDC при одинаковых конструкциях долота, что позволяет сократить время бурения и снизить расходы на строительство скважин.

Разработанные конструкции двухъярусных антивибрационных буровых долот, армированных пластинами PDC, позволяют сформировать их основные

отличительные характеристики: оптимизированный короткий параболический профиль, пригодный для бурения в породах от V до IX категории по буримости; расположение по спирали режущих лопастей обеспечивает долотам большую стабильность, управляемость и устойчивость во время бурения; использование в комбинации высокопроизводительных цилиндрических, гребнеобразных и конусных пластин PDC существенно продлевает срок службы долот; опционально устанавливаемые вторые ряды резцов позволяют бурить сложные интервалы бурения, способствуя при этом снижению вибрации; гидравлика долота обеспечивается установкой сменных насадок. Внедрение разработанного породоразрушающего инструмента и технологии его применения в практику буровых работ позволит добиться увеличения механической скорости бурения долотами в 1,5 раза и проходки на долото на 30 %.

Основные выводы и рекомендации

Выполненные экспериментальные и теоретические исследования по теме диссертации позволили сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Обобщён опыт и систематизированы результаты исследований по конструкции буровых долот, армированных пластинами PDC, позволившие сформулировать основные цели и задачи исследования.

2. На основании выполненных экспериментов по ускоренному изнашиванию режущих элементов буровых долот, получены зависимости определения интенсивности изнашивания пластин PDC по высоте при бурении пород средней и выше средней крепости.

3. Установлена закономерность, позволившая разработать нейросетевую модель, позволяющую прогнозировать интенсивность аномального изнашивания резцов PDC буровых долот, которую целесообразно применять при разработке технологии бурения с целью повышения эффективности буровых работ и повышения качества отработки буровых долот.

4. Геометрическая оптимизация углов установки PDC-резца выполнена в программной среде «SolidWorks».

5. Предложена модель прогнозирования степени износа PDC-резца на основе регрессионных моделей, полученных имитационно-экспериментальным методом с использованием программной среды Abaqus Explicit.

6. Разработан конструктивный ряд двухъярусных антивибрационных буровых долот, армированных пластинами PDC, применение которых способствует значительному уменьшению степени вибрации.

7. Внедрение в практику буровых работ разработанных буровых долот диаметром 215,9 мм для условий работы ООО НПП «Ростовская буровая компания» позволило достичь проходки на долото 1100 метров, при средней механической скорости бурения по горным породам VI-VII категории по буримости равной 29,5 м/час.

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в следующих основных работах:

– в работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК):

1. Конструкции буровых коронок, армированных АТП, с учётом схемы разрушения забоя скважины / Третьяк А.А., Гроссу А.Н., Борисов К.А. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2015, № 6. – С. 9–12.

2. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / Третьяк А.А., Попов В.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017, № 8. – С. 225–230.

3. Лабораторные исследования износостойкости режущих элементов буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами / Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Гроссу А.Н., Борисов К.А. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018, № 5. – С. 26–30.

– в изданиях, входящих в международную базу цитирования SCOPUS:

4. New generation drilling bits / A.A. Tretyak, V.I. Balaba, V.V. Popov, N.E. Fomenko, K.A. Borisov, V.A. Tkachev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Volume 87, Issue 5, Number 052029. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/5/052029/pdf>.

5. Влияние конструктивных особенностей коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами, на эффективность бурения горных пород / Третьяк А.А., Гроссу А.Н., Борисов К.А. // Горный журнал. 2018, № 2. – С. 85–90.

6. Method of calculating the wear, ROP and PDC bit operating time / Tretyak, A.A., Borisov, K.A., Grossu, A.N. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. С. 022214. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/272/2/022214/pdf>.

7. The use of new wear-resistant materials in the development of two-level bits with a balanced resultant moment at the drilling flight / Tretyak, A.A., Borisov, K.A., Grossu, A.N. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. 272(2), 022213. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/272/2/022213/pdf>.

8. Hydrodynamic analysis of the PDC drill bits / Tretyak, A.Y., Borisov, K.A., Getmanchenko, S.A. // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019 (2020 Taylor & Francis Group, London, UK) Volume 2, 2020, pp. 935–939.

9. Method of calculating the wear and PDC bit operating time / Borisov, K.A., Tretyak, A.A. // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019 (2020 Taylor & Francis Group, London, UK) Volume 2, 2020, pp. 791–795.

10. Определение поломок резцов PDC с помощью регрессионного и нейросетевого моделирования / Третьяк А.А., Кузнецова А.В., Борисов К.А. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019, Т. 330, № 5. – С. 169–177.

11. Влияние крутильных и продольных колебаний на скорость бурения и образование поломок режущих элементов буровых долот, армированных PDC / Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А. // Известия Томского

политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 12. – С. 135–141.

12. Результаты применения новых конструкций буровых долот, армированных резцами гребнеобразной формы PDC / Третьяк А.Я., Нырков Е.А., Сидорова Е.В., Борисов К.А. // Устойчивое развитие горных территорий. 2019, Т. 11. – № 4 (42). – С. 519–527.

– в патенте РФ на изобретение:

13. Стабилизирующее двухъярусное долото режуще-скалывающего типа. Патент № 2695726. РФ / Борисов К.А. // Заявл. 13.04.2018, опубл. 25.07.2019, бюл. № 21.

Научные результаты диссертации отражены также в следующих научных изданиях:

14. Определение рациональных значений рабочих углов армирующих элементов буровых коронок / Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А. // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2017. – № 3 (63). – С. 70-73.

15. Лабораторные исследования поломок режущих элементов буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами / Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Гроссу А.Н., Борисов К.А. // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2018. – № 7 (79). – С. 50–54.

16. Влияние вибраций на прочностные свойства буровых долот, армированных PDC / Борисов К.А., Третьяк А.А., Сидорова Е.В. // Разведка и охрана недр. 2019. – № 12. – С. 33–37.

Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на международных конференциях:

17. Разработка конструкции долота, армированного АТП / Третьяк А.Я., Борисов К.А. // Бурение скважин в осложненных условиях: материалы Международной научно-практической конференции. 2016. Санкт-Петербургский горный университет. 2016. – С. 118–121.

18. Стабилизирующее двухъярусное долото режуще-скалывающего типа / Борисов К.А., Третьяк А.А. // В сборнике: Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ). Материалы Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. 2018, Т. 2. – С. 12–13.

19. Методика расчета износа и наработки на долото, армированное PDC / Борисов К.А., Третьяк А.А. // В книге: Бурение скважин в осложненных условиях. Тезисы докладов III Международной научно-практической конференции «Бурение скважин в осложненных условиях». Санкт-Петербургский горный университет. 2018. – С. 17–19.

20. Особенности конструкции буровых долот, армированных PDC / Третьяк А.Я., Нырков Е.А., Сидорова Е.В., Борисов К.А. // В сборнике: Актуальные проблемы недропользования. Материалы Международной научно-практической конференции. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. 2019. – С. 161–165.

21. Применение нейронных сетей для моделирования поломок резцов PDC / Третьяк А.Я., Кузнецова А.В., Борисов К.А. // В сборнике: Актуальные проблемы недропользования. Материалы Международной научно-практической

конференции. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. 2019. – С. 156–160.

22. Влияние колебаний бурильной колонны на скорость бурения и образование поломок режущих элементов буровых долот, армированных PDC / Борисов К.А. // В сборнике: Актуальные вопросы геологии. Материалы Международной научно-практической конференции. Старооскольский филиал ФГБОУ ВО МГРИ. 2019. – С. 58–62.

Борисов Константин Андреевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ
СКВАЖИН ПУТЕМ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ АНОМАЛЬНОГО ИЗНОСА
РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДОЛОТ РДС**

Автореферат

Подписано в печать 23.10.2020.

Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. 1.39. Тираж 100 экз. Заказ № 46-0343.

Отпечатано в ИД «Политехник»

346428, г. Новочеркасск, ул. Первомайская, 166

idr-npi@mail.ru