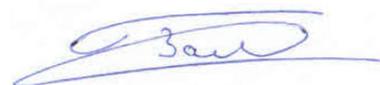


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

На правах рукописи



ВАЛЯМОВ КАРИМ РАМИЛЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН ПУТЕМ
РАЗРАБОТКИ ШАРОШЕЧНОГО ДОЛОТА С ПИРАМИДАЛЬНЫМ
СТАЛЬНЫМ ВООРУЖЕНИЕМ ВНУТРЕННИХ РЯДОВ**

Специальность 2.8.2. – Технология бурения и освоения скважин

диссертация на соискание ученой степени
кандидат технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ишбаев Гниятулла Гарифуллович

Уфа 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ, ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	11
1.1 Обзор структуры рынка породоразрушающего инструмента. Область применения, достоинства и недостатки шарошечных долот	11
1.2 Обзор решений, направленных на увеличение стойкости стального вооружения шарошечных долот	15
1.3 Обоснование применения шарошечных долот со стальным вооружением в верхних интервалах Восточной Сибири.....	26
1.4 Выводы по главе 1.....	35
2 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗНОСА СТАЛЬНОГО ВООРУЖЕНИЯ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ	36
2.1 Анализ причин выхода из строя шарошечных долот.....	36
2.2 Анализ адекватности полученных экспериментальных данных	41
2.3 Анализ горно-геологических условий применения шарошечных долот.....	46
2.4 Исследование характера износа вооружения шарошечных долот	49
2.5 Исследование влияния износа стального вооружения шарошечных долот на эффективность бурения	59
2.6 Обоснование решений по увеличению стойкости внутренних рядов стального вооружения шарошечных долот.....	66
2.6.1 Обоснование разработки пирамидальных зубьев для шарошек шарошечных долот со стальным вооружением	67
2.6.2 Обоснование разработки стали 19ХГНЗМА для шарошек шарошечных долот со стальным вооружением	71
2.6.3 Расчет методом конечных элементов вариантов исполнения стального вооружения шарошечного долота	84
2.7 Выводы по главе 2.....	89

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТОЙКОСТИ СТАЛЬНОГО ВООРУЖЕНИЯ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ	91
3.1 Экспериментальный стенд и методика проведения исследования.....	92
3.2 Планирование испытаний по определению стойкости стального вооружения шарошечных долот при циклических ударных нагрузках	94
3.3 Результаты и обработка полученных данных	101
3.4 Выводы по главе 3.....	104
4 РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БУРЕНИЯ ШАРОШЕЧНЫМИ ДОЛОТАМИ С ПИРАМИДАЛЬНЫМ СТАЛЬНЫМ ВООРУЖЕНИЕМ	105
4.1 Разработка шарошечного долота с пирамидальным стальным вооружением внутренних рядов	105
4.2 Опытно-промысловая отработка шарошечного долота с пирамидальным стальным вооружением внутренних рядов	111
4.3 Разработка методики применения шарошечных долот при бурении валунно-галечных отложений	117
4.4 Выводы по главе 4	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
Список сокращений и условных обозначений	121
Список использованных источников	122
Приложение А (справочное)	132
Приложение Б (справочное)	135
Приложение В (справочное)	136
Приложение Г (справочное)	137
Приложение Д (справочное)	138
Приложение Е (справочное)	142
Приложение Ж (справочное)	143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Увеличение потребления углеводородов во всем мире в совокупности с постепенным истощением введенных в эксплуатацию месторождений нефти и газа стимулирует развитие новых регионов нефтедобычи. Первым этапом эффективной разработки нефтяных и газовых месторождений является этап строительства скважин - наиболее трудоемкий и требующий значительного объема инвестиций. Процесс бурения занимает одно из ключевых мест во временной сетке строительства скважины, поэтому снижение времени бурения приводит к существенной оптимизации расходов. Снижение трудоемкости и увеличение технико-экономических показателей бурения скважин является актуальной задачей. Одним из способов снижения времени является увеличение эффективности работы породоразрушающего инструмента.

Эффективность работы породоразрушающего инструмента и, как следствие, разрушения горной породы в течение всего цикла бурения, напрямую зависит от ресурса и стойкости элементов вооружения долот. При бурении верхних интервалов месторождений Восточно-Сибирского региона, сложенных мягкими и мягко-средними горными породами с включениями валунно-галечных отложений, наблюдается проблема преждевременного износа вооружения долот. Подвергаются катастрофическому износу как PDC долота по причине сколов и сломов резцов PDC, так и шарошечные долота. Применение шарошечных долот второго класса не целесообразно из-за низких скоростей проходки в основной массе разреза ствола скважины. Использование шарошечных долот первого класса, со стальным вооружением, приводит к опережающему износу, выраженному сломом зубьев внутренних рядов шарошки. Это приводит к «подвисанию» долота и потере механической скорости проходки.

Учитывая отсутствие конструкции долота для бурения горных пород, осложненных валунно-галечными отложениями, с высокими механическими скоростями бурения, и необходимость увеличения стойкости внутренних рядов шарошечных долот к ударным нагрузкам, предлагаемая тематика является актуальной. Кроме того актуально создание методики применения шарошечных долот в условиях осложнения разреза валунно-галечными отложениями.

В связи с этим, задача, связанная с разработкой конструкции шарошечного долота с усиленным стальным вооружением, позволяющей минимизировать износ внутренних рядов стального вооружения, и, соответственно, увеличить относительный запас вооружения по рядам актуальна, особенно при бурении интервалов, осложненных валунно-галечными отложениями.

Степень разработанности темы

Теоретической и методической основой исследования послужили работы ученых: Алеекеева Л.А., Богомолова Р.М., Балицкого В.П., Гусмана А.М., Гельфгата М.Я., Головкина С.А., Ишбаева Г.Г., Комма Э.А., Мавлютова М.Р., Матюшина П.Н., Мительмана Б.И., Мокшина А.С., Неупокоева В.Г., Попова А.Н., Серикова Д.Ю., Спивака А.И., Трушкина Б.Н., Трушкина О.Б., Ясашина В.А., Юдина А.С., R.H. Smith, J. Ford Brett и др.

Работа является продолжением детального изучения вопроса повышения производительности шарошечных долот, проводимого кафедрой БНГС УГНТУ. Особое внимание следует уделить работам, выполненным в УГНТУ при соавторстве профессора Попова А.Н., и посвященным изучению вопросов стойкости вооружения шарошечных долот первого класса.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тематика и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 2.8.2. – «Технология бурения и освоения скважин» (технические науки), а именно п.3 и п.4:

пункт 3: Технология бурения скважин на суше и на море. Разрушение горных пород в скважине с использованием механических, тепловых, электромагнитных и других способов и средств воздействий в термобарических условиях их залегания. Технологии и технические средства различных способов бурения. Технология и технические средства строительства морских скважин с подводным и надводным расположением устья.

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

Цель работы

Улучшение показателей работы шарошечных долот для бурения мягких, осложненных валунно-галечными отложениями, горных пород путем выявления области износа и конструктивного усиления внутренних рядов шарошек долот.

Основные задачи работы

1. Анализ влияния горно-геологических факторов на снижение механической скорости проходки в связи с преждевременным неравномерным износом стального вооружения шарошечных долот. Выделение наиболее эффективной области применения шарошечных долот со стальным вооружением.

2. Исследование влияния геометрических и физико-механических параметров единичных элементов вооружения на стойкость к циклическим ударным нагрузкам путем проведения сравнительных экспериментов на стенде.

3. Проектирование шарошечного долота с пирамидальным

стальным вооружением внутренних рядов и разработка методики по применению шарошечных долот со стальным вооружением при осложнении разреза валунно-галечными отложениями.

4. Проведение опытно-промысловых испытаний конструкции шарошечного долота с пирамидальным стальным вооружением внутренних рядов с достижением целевого показателя механической скорости.

Научная новизна

1. Аналитически установлено, что преждевременный отказ шарошечных долот со стальным вооружением при бурении мягких горных пород, осложненных валунно-галечными отложениями, возникает при ударных нагрузках из-за опережающего износа зубьев внутренних рядов со сниженным относительным запасом вооружения до 34 % по сравнению с периферийными зубьями.

2. Экспериментально показано, что повышение стойкости внутренних рядов обеспечивается зубьями в виде усеченной восьмигранной пирамиды, с площадкой притупления от 3 до 14 мм, образующей в сечении восьмиугольник, прямые стороны которого равны и параллельны, а угол заострения равен 48° в совокупности с изготовлением из долотной стали 19ХГНЗМА. Указанные зубья обеспечивают наименьшие суммарные напряжения, снижают относительную массовую потерю металла при ударных нагрузках более чем в 2 раза и увеличивают относительный запас вооружения до 2-х раз без снижения средней эффективности разрушения горной породы.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в экспериментальном обосновании конструкции шарошечного долота БИТ 295,3 Z2RSJ U700 с пирамидальной геометрией стального вооружения, предупреждающая опережающих износ внутренних рядов стального вооружения при бурении валунно-галечных отложений на основе исследований геометрических

моделей единичных элементов вооружений с последующей оценкой стойкости к циклическим ударным нагрузкам.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Методика по применению шарошечных долот при осложнении разреза валунно-галечными отложениями, внедренная в производственно-технологических процесс ООО НПП «БУРИНТЕХ». Создано электронное учебно-методическое издание «Шарошечные долота. Основные узлы. Принцип работы. Область применения», которое внедрено в учебный процесс по дисциплине «Разрушение горных пород» по профилям 21.03.01 и 21.05.06.

2. Патент на пирамидальную геометрию стального зуба для шарошки бурового шарошечного долота (Патент РФ на полезную модель №212334 «Шарошка бурового долота», оп. 18.07.2022 г); патент на долотную сталь (Патент РФ на изобретение №2704049 «Долотная сталь» оп.23.10.2019 г).

3. Увеличение механической скорости проходки при бурении интервала под кондуктор, осложненного валунно-галечными отложениями, путем применения шарошечного долота БИТ 295,3 Z2RSJ U700 по результатам опытно-промысловых испытаний.

Методология и методы исследования

Решение задач диссертационного исследования осуществлялось аналитически и экспериментально при помощи стандартных и самостоятельно разработанных методик, специально созданного экспериментального стенда, методов статистической обработки данных и применения современных программных комплексов и систем компьютерного моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитические исследования причин вывода из эксплуатации шарошечных долот и исследование снижения механической скорости проходки по причине износа внутренних рядов стального вооружения

шарошечных долот при осложнении разреза валунно-галечными отложениями.

2. Геометрическая модель пирамидального стального зуба для шарошки долота в комбинации с применением долотной стали с увеличенным показателем ударной вязкости, позволяющая увеличить стойкость зуба к циклическим ударным нагрузкам при бурении валунно-галечных отложений.

3. Конструкция шарошечного долота БИТ 295,3 Z2RSJ U700 с пирамидальной геометрией стального вооружения, обеспечивающая снижение износа внутренних рядов в процессе бурения валунно-галечных отложений.

4. Методика по применению шарошечных долот в породах, осложнённых валунно-галечными отложениями, ограничивающая режимные параметры бурения при прохождении разреза валунно-галечных отложений, позволяющая снизить износ элементов вооружения.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивалась применением широко апробированных методов и методик, экспериментальных исследований, осуществленных на поверенном оборудовании.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на: 70-й, 73-й научно – технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2019 г, 2022 г); международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле» (Уфа, 2017 г); 73-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ» (Москва 2019 г); VII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Экологические проблемы нефтедобычи» (Уфа, 2018 г); Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники-2021» (Уфа, 2021 г); научно-практической конференции «Актуальные

проблемы и инновации в области строительства и ремонта скважин» (Альметьевск, 2022 г); международной научно – практической конференции, посвященной 90-летию начала добычи первой башкирской нефти (Уфа, 2022 г). Работа отмечена Комитетом молодежной премии в области науки и техники «Надежда России» Российского Союза научных и инженерных общественных объединений (Москва, 2023 г).

Публикации по теме диссертации

Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 17 публикациях, в том числе в 2 патентах РФ и 4 статьях в изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников из 106 наименований и 7 приложений. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, включает 57 рисунков и 22 таблицы.

Автор выражает благодарность за помощь научному руководителю, д.т.н., профессору, ген. директору ООО НПП «БУРИНТЕХ» Г.Г. Ишбаеву; д.т.н., профессору Ирмакову Р.А.; д.т.н., профессору А.Н. Попову; к.т.н. Ковалевскому Е.А.

1 ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ, ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1 Обзор структуры рынка породоразрушающего инструмента. Область применения, достоинства и недостатки шарошечных долот

Стоимость буровых шарошечных долот составляет долю до пяти процентов от общей стоимости строительства скважины. Долота являются одним из ключевых компонентов экономики строительства скважины. Потому что от производительности и стойкости породоразрушающего инструмента зависит общее время, требуемое на строительство скважины и количество спускоподъемных операций [3].

На современном рынке породоразрушающего инструмента доминируют долота режуще-скалывающего действия. К такому инструменту относятся долота с поликристаллическими алмазами – долота PDC (Polycrystalline diamond compact). Динамика их развития и широкого применения началась в 80-х годах прошлого столетия. К началу 2000 года данный тип долот составлял порядка 45 % от всего мирового объема бурения на нефть и газ. К 2010 году объем бурения составил порядка 75 % [28]. На сегодняшний день баланс сохраняется, и породоразрушающий инструмент дробяще-скалывающего действия, который представлен шарошечными долотами, сохраняет объемы порядка 6-8% от общемировых объемов бурения на нефть и газ.

Сохранение данного баланса обусловлено тем, что шарошечные долота применяются в условиях, в которых невозможно или экономически нецелесообразно использовать PDC – долота, а именно в условиях:

- сложной геологии;
- поглощений и сниженных расходов буровой промывочной жидкости;

- необходимости интенсивного набора кривизны скважины;
- бурения верхних интервалов большого диаметра на морских и сухопутных скважинах.

Основой для рассмотрения баланса потребления, и соответственно, производства шарошечных долот в различных исполнениях на территории Российской Федерации принята статистика производства шарошечных долот компанией ООО НПП «БУРИНТЕХ». Исходя из того, что мощностями данной компании производится полная номенклатура шарошечных долот в габаритах от 46 мм до 914 мм в различных исполнениях, можно говорить об объективности приведенных данных. На Рисунке 1.1 приведено процентное соотношение долот со стальным и твердосплавным исполнениями зубьев соответственно в динамике за 2017-2019 года на основании данных о выпуске шарошечных долот компанией «БУРИНТЕХ».



Рисунок 1.1 – Соотношение по типам шарошечных долот

Из приведенной выше диаграммы видна динамика увеличения потребления шарошечных долот со стальным вооружением. Шарошечные долота со стальным вооружением наиболее часто применяются при таких операциях как, зарезка боковых стволов, бурение секций большого диаметра (от 295,3 мм) на морских и оффшорных месторождениях, бурение верхних интервалов в осложненных условиях.

Рынок породоразрушающего инструмента характеризуется систематическим снижением стоимости метра проходки, и как следствие, падением стоимости породоразрушающего инструмента, в том числе шарошечных долот. Данное требование актуально всегда, но при снижении объемов рынка и при переходе в специализированный (нишевый) сегмент приобретает особенную остроту. Это связано с возросшей конкуренцией производителей, увеличением издержек на производство из-за снижения объемов выпуска. Так, при проведении научных изысканий по проблематике совершенствования стального вооружения шарошечных долот имеет место разработка наиболее эффективной конфигурации изготовления и применения шарошечных долот под конкретные горно-геологические условия.

Шарошечное долото, применяемое в качестве породоразрушающего инструмента, является основополагающим компонентом буровой системы, принципиально влияющим на эффективность всего процесса бурения. Оно представляет собой сложную и многокомпонентную систему, поэтому производительность, надёжность и продолжительность работы долота зависят как от совершенства конструкции и качества изготовления, так и от правильной эксплуатации, соблюдении режимных параметров бурения [4].

При этом важно выделить ключевые достоинства и недостатки породоразрушающего инструмента дробяще-скалывающего действия.

Разрушение горной породы шарошечным долотом осуществляется путем дробления горной породы (с присутствием компонента скалывания в конструкциях долот для мягких и мягко-средних горных пород). В принципиальном отличии механизма разрушения горной породы кроются основные достоинства шарошечных долот. Дробяще-скалывающее взаимодействие на горную породу основано на вдавливании зубьев (зубков) шарошек в горную породу в каждый момент времени. Взаимодействующий с породой зуб долота вдавливается в породу силой P_z и одновременно участвует в обусловленных кинематикой долота скольжении со скоростью V_f

и вращении с угловой частотой ω . В это же время соседний зуб движется к поверхности породы со скоростью V_y и наносит удар по поверхности породы. В следующие моменты времени нагрузка перераспределяется с первого зуба на второй, и далее на первый зуб, который выходит из контакта с породой. Таким образом, каждый элемент вооружения долота периодически оказывает на горную породу сложное дробяще-скалывающее действие, схема которого приведена на Рисунке 1.2 [4].

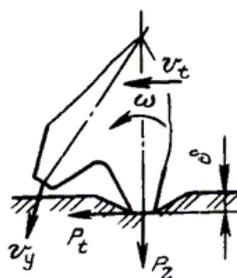


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема воздействия вооружения шарошечного долота на горную породу

Данная кинематическая зависимость, присущая шарошечным долотам, позволяет эффективно разрушать горную породу с различными показателями буримости и абразивности. Для возможности осуществления дробяще-скалывающего эффекта требуется вращение шарошек относительно долота.

Исходя из схемы, можно выделить ключевые достоинства и недостатки шарошечных долот. К достоинствам при эксплуатации шарошечных долот относится:

- а) низкий крутящий момент для вращения на забое за счет применения подшипникового узла в конструкции шарошечного долота;
- б) универсальность применения благодаря возможности варьирования механизма взаимодействия шарошечного долота с забоем скважины;

в) высокая стойкость шарошечного долота при работе в абразивных, трещеноватых, переслаивающихся и твердых горных породах по причине высокой вибрационной стойкости элементов долота;

г) низкая требовательность к системам очистки и циркуляции буровой промывочной жидкости из-за отсутствия постоянного контакта элементов вооружения с горной породой;

д) экономическая целесообразность применения шарошечных долот, особенно в больших габаритах по причине меньшей стоимости шарошечных долот большого диаметра.

К недостаткам применения возможно отнести:

- низкая, относительно режуще-скалывающего типа долот, скорость разрушения горной породы, обусловленная характером воздействия на горную породу;

- ресурс шарошечного долота зависит от совокупности факторов, таких как циклическая стойкость подшипникового узла и стойкость вооружения.

Перечисленные технические факторы в совокупности с современными рыночными условиями, описанными выше, определяют основные требования, предъявляемые к шарошечным долотам.

1.2 Обзор решений, направленных на увеличение стойкости стального вооружения шарошечных долот

Разработка и внедрение широкого спектра буровых шарошечных долот началась во многом благодаря увеличению объемов бурения и глубин скважин в 30-х годах 20-го века. С тех пор, на протяжении почти 100 лет, шарошечные долота остаются востребованными на рынке породоразрушающего инструмента. Применение шарошечных долот со стальным вооружением распространено в широком диапазоне твердости горных пород, начиная с мягких (М), где применяются долота с высокой

агрессивностью вооружения, и где преобладает скалывающий эффект, до твердых горных пород, где вооружение характеризуется большим количеством зубьев, при этом обладает меньшей агрессивностью и выражается преимущественно дробящим эффектом. Исходя из сложившейся многолетней практики [31] шарошечные долота со стальным вооружением не рекомендуется применять в абразивных горных породах, т.е. в категориях ОМЗ – ТКЗ, а также в категориях твердости К и ОК [27]. В остальных горно-геологических условиях применение шарошечных долот со стальным вооружением имеет высокую эффективность бурения при правильно подобранном вооружении.

Долота со стальным вооружением, под которым подразумеваются стальные зубья, дополнительно армированные твердосплавными композитными материалами. На Рисунке 1.3 указан вид сбоку и вид сверху.

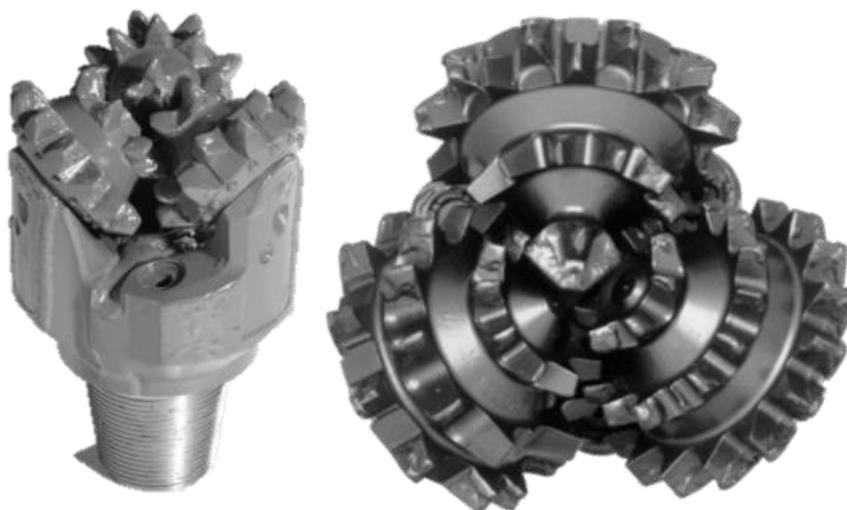


Рисунок 1.3 – Шарошечное долото со стальным вооружением

Долота со стальным вооружением используются в мягких породах с низкой прочностью на сжатие, а также в породах средней твердости. Для достижения высоких скоростей бурения в мягких породах, в конструкциях долот преобладают стальные зубья с высотой зуба H , равным $(1,4...1,8) \cdot B$, где B – ширина зуба, показано на Рисунке 1.4. Также на Рисунке 4

обозначены 1 – стальной зуб, выступающий за тело шарошки, 2 – тело шарошки, 3 – фаски, ограничивающие нанесение армирующего покрытия.

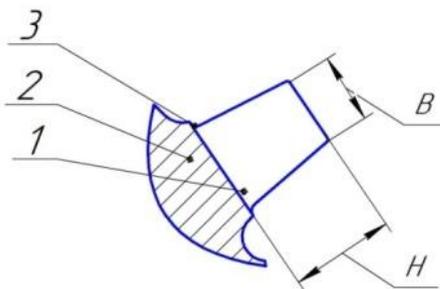


Рисунок 1.4 – Схема стального зуба

Конфигурация способствует проникновению в горную породу и ее удаление путем долбления и скалывания. Баланс между механизмами разрушения горной породы достигается в подборе угла наклона цапфы лапы, формы и геометрии зубьев шарошек.

Физически процесс внедрения зубка в горную породу можно разделить на два этапа – внедрение и дробление (а) и выход зубка из горной породы (б), как показано на Рисунке 1.5 [55].

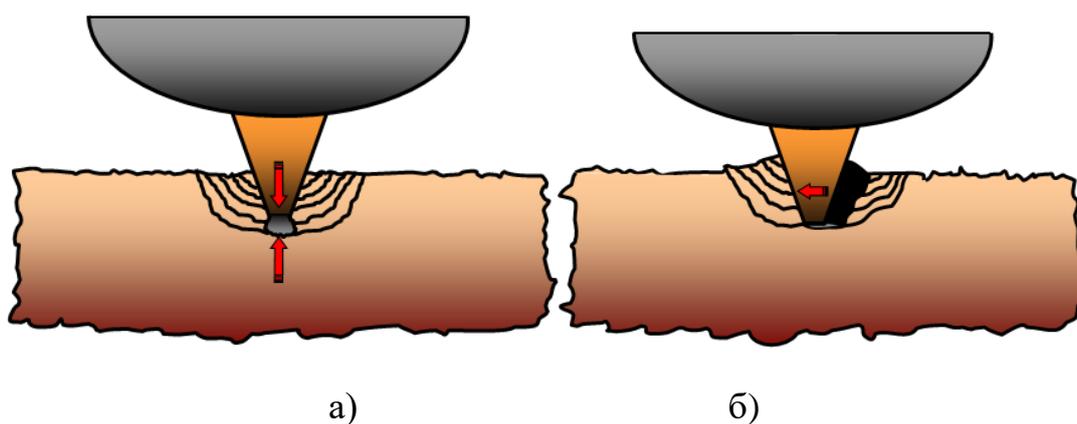


Рисунок 1.5 – Физический процесс внедрения зуба в горную породу

Так, при бурении и разрушении мягких и мягко-средних горных пород происходит значительная работа, выраженная попеременным внедрением зубьев шарошек в горную породу.

Зачастую эксплуатационные ограничения буримости горных пород связаны с высокой вероятностью эрозионного размыва основных рядов вооружения, а также их сколов вследствие применения в переслаивающихся по твердости горных породах. Суммируя вышеизложенные факторы, можно говорить о том, что шарошечные долота со стальным вооружением обладают высокой эффективностью в ряде случаев, но при этом их вооружение отличается относительно низкими ресурсными показателями.

Рассматривая данный вопрос, требуется уделить отдельное внимание тому, что на сегодняшний день шарошечные долота со стальным вооружением, армированным твердосплавным покрытием применяются при бурении верхних интервалов скважин, таких как направления, кондуктора, технические колонны, т.е. интервалы строительства скважины, где требуется обеспечить максимальную скорость бурения. И темпы проводки скважины в основном зависят от эффективности работы породоразрушающего инструмента. Влияние пространственных, технологических факторов сведено к минимуму. Горные породы сложены в основном обломочными глинистыми (около 54 %) и обломочными мелкозимистыми и песчаными (около 21 %) компонентами.

Обоснование необходимости всестороннего совершенствования невозможно без выделения наиболее благоприятных горно-геологических и как следствие, географических районов применения шарошечных долот со стальным вооружением. Например, при строительстве скважин на месторождениях Урало – Поволжья, где существует проблема поглощений в верхних интервалах (до 350-400 м), как правило, применяются шарошечные долота. Геолого-литологический разрез представлен отложениями, для которых характерно аномально низкое пластовое давление, которое обуславливается наличием пор, трещин, каналов, карстовых пустот в разбуриваемых горизонтах, недостаточной устойчивостью к рабочим давлениям в скважине, что приводит к поглощениям промывочной жидкости.

Естественные трещины могут являться причиной поглощения бурового раствора в случаях, когда его потери случаются во время или сразу после бурения в твердых породах, или же при смене пластов. Поэтому на площадях Урало - Поволжья шарошечные долота превратились в целевой инструмент, применяемый при крайне тяжелых, экстремальных условиях. При этом бурение производится с ограничением по расходу во избежание возможных поглощений промывочной жидкости и использование PDC – долот невозможно [74].

Также, в ряде месторождений Восточной Сибири, таких как Ванкорское, Средне-Угутское, Куюмбинское, Средне-Бутобинское при бурении секций под кондуктор встречаются в разрезе валунно - галечные отложения, которые эффективно разбуриваются шарошечными долотами. Данный вопрос более подробно рассмотрен во второй главе данной работы.

Для получения максимально возможной скорости бурения при строительстве скважин использую форсированные режимы бурения, включающие в себя максимальную нагрузку на долото, которая может достигать несколько десятков тонн в зависимости от типа и диаметра инструмента. Для увеличения технико-экономических показателей повышается частота вращения долота, которая при использовании верхнего силового привода вкупе с гидравлическим забойным двигателем, может достигать 280-320 об/мин. Такие режимы подразумевают высокое давление в циркуляционной системе для обеспечения бесперебойной работы ГЗД, равномерной очистки забоя от выбуренной горной породы, а также создания гидромониторного эффекта для эффективного воздействия на забой.

Вышеуказанные факторы прямым образом влияют на вооружение шарошечного долота. Вооружение шарошечного долота испытывает многократные разнонаправленные ударные нагрузки, подвергается абразивному изнашиванию и эрозионному воздействию потока промывочной жидкости, через многокомпонентную систему подшипникового узла

воспринимает крутильные нагрузки, возникающие при разбурировании горной породы.

Обращая внимание на элементы опоры, стоит упомянуть, что они подвержены фрикционному изнашиванию от взаимодействия между ее элементами, а так же от возможного попадания в опору абразивных частиц, что оказывает наиболее пагубное влияние на современные герметизированные подшипниковые узлы долот. Величина зазоров в опорах современных шарошечных долот чрезвычайно мала, что делает их крайне уязвимыми к попаданию в опору абразивных частиц. Поэтому опора защищается от бурового раствора уплотнительным узлом, ресурс которого также определяет ресурс шарошечного долота [81]. Визуализация зависимости изменения агрессивности вооружения показана на Рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Общий вид вооружения шарошечных долот

Для проведения полноценного анализа по текущей проблематике развития направления совершенствования шарошечных долот со стальным вооружением необходимо выделить существующие решения по повышению эксплуатационных характеристик стального вооружения. Под эксплуатационными характеристиками понимается увеличение механической

скорости проходки без потери ресурса всех компонентов долота, которое гарантирует безаварийное бурение.

Существующие решения делятся на две группы технических решений.

К решениям первой группы относится увеличение стойкости вооружения с увеличением твердости горных пород. Положительный эффект достигается за счет снижения скалывающего эффекта и увеличения количества рядов на шарошках в совокупности с уменьшением агрессивности отдельно взятых зубьев шарошек. Уменьшение агрессивности зубьев достигается за счет увеличения угла заострения зуба, увеличения притупления зуба [27,53].

Также изменяется геометрия конусов шарошек. Вышеуказанные решения общеизвестны и применяются на всех типах шарошечных долот.

На Рисунке 1.6 представлены долота в габарите 295,3 мм с кодами IADC 117, 137, 217, 247 слева направо соответственно. В Раблице 1.2 приведены фактические данные по долотам на Рисунке 1.6, по которым прослеживается изменение характеристик вооружения шарошечных долот.

Таблица 1.2 – Характеристики шарошечных долот

Код IADC	117	137	217	247
Область применения ГОСТ 20692	М	МС	С	СТ
Параллельное смещение осей, мм	9,525	7,125	6,725	4,75
Количество рядов, шт.	7	8	9	12
Количество зубьев, шт.	65	78	109	160

Профиль вооружения шарошек долот в габарите 295,3 мм с кодом IADC 117 и 247 представлены на Рисунке 1.7.

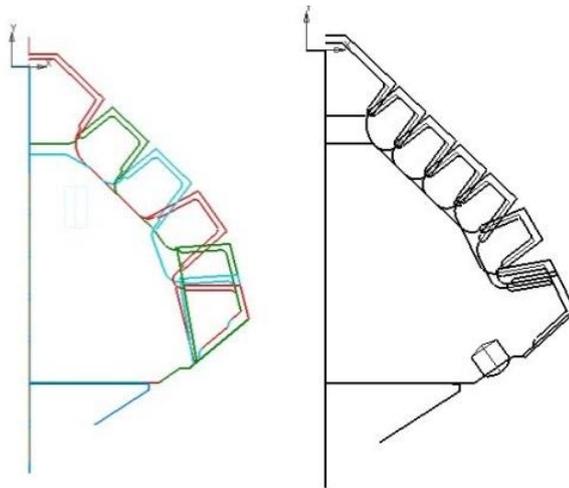


Рисунок 1.7 – Сравнение типов стального вооружения

Решения первой группы положительно влияют на эффективность бурения шарошечными долотами в различных типах горных пород. Используется не как средство повышения эффективности бурения в конкретных горно-геологических условиях, а как адаптация к применению в различных горно-геологических условиях, не влияя напрямую на эффективность бурения в каждой области применения по причине разной буримости горных пород.

Ко второй группе технических решений относятся различные модификации стального вооружения шарошечных долот в рамках одной категории твердости буримых горных пород:

1. Изменение геометрии зубьев. К таким решениям относят применение скошенных зубьев, схема которых представлена на Рисунке 1.8. Преимуществом является удлинение рабочей кромки зуба и равномерное нагружение зубьев в ряду. Совершается большее количество работы каждым зубом, но в связи с нагружением части зуба происходит увеличение нагрузки с ее концентрацией на основании зуба. В основном, применяется в породах категории твердости М, МС [37].

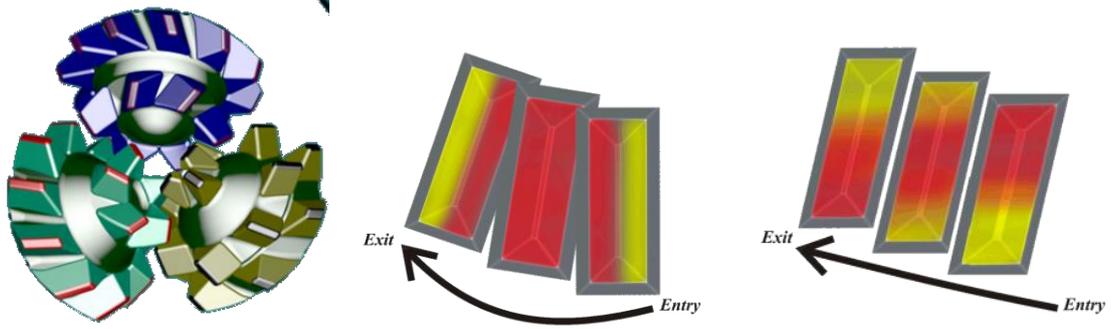


Рисунок 1.8 – Схема скошенных зубьев

2. Внедрение поперечных перемычек между зубьями одного венца. Перемычки служат для предотвращения образования рейки, снижения налипания выбуренной породы на тела шарошек. К недостаткам относится большая поверхность контакта шарошки с забоем, что приводит к меньшей удельной нагрузке и, как следствие, снижению интенсивности разрушения горной породы [7,8,65,66].

3. Применение дополнительных твердосплавных зубков во впадинах между зубьями периферийных (калибрующих) рядов. Позволяет повысить долговечность вооружения и скорость бурения за счет выравнивания распределения запаса вооружения по радиусу долота. На шарошки с наиболее длинными зубьями периферийного венца на дне впадин между периферийными зубьями в шахматном порядке относительно подрезных калибрующих зубков устанавливаются дополнительные твердосплавные зубки заподлицо с внутренними торцами зубьев периферийного венца. Данный способ позволяет повысить износостойкость вооружения и увеличить эффективность формирования стенки скважины, но при его реализации не происходит увеличение ресурса основных рядов стального вооружения [68].

4. Использование твердосплавного армирующего покрытия зубьев шарошек из материала на основе карбида вольфрама. Применение композитного материала с твердостью 68-72 HRC обеспечивает защиту

зубьев от эрозионного размыва и увеличивает стойкость вооружения. Применение объемной наплавки зубьев из карбидосодержащих материалов эффективно из-за высокой твердости, сопротивляемости абразивному износу. Технология позволяет увеличить ресурс и износостойкость, но при этом не способна обеспечить стойкость зубьев при продолжительных форсированных режимах бурения, особенно в переслаивающихся горных породах [105,106].

Таким образом, повышение износостойкости и увеличение производительности разрушения горной породы решается только путем усиления стального вооружения за счет дополнительного армирования тем или иным методом и модернизации геометрии стального вооружения под конкретные области применения. Они, в свою очередь, регламентируются ГОСТом или кодом IADC, без учета частных факторов, влияющих на эффективность применения шарошечных долот. Тем самым вышеуказанные технические приемы по увеличению стойкости не решают весь спектр проблем, связанных с высокоэффективным бурением шарошечными долотами со стальным вооружением в конкретных горно-геологических условиях Восточной Сибири.

Научная проблема повышения эффективности применения шарошечных долот со стальным вооружением является актуальной на протяжении применения шарошечных долот. Особенно остро данная проблема возникает при эксплуатации шарошечных долот на форсированных режимах применения.

Стоит упомянуть авторский коллектив УГНТУ, занятый в работе по повышению эффективности применения шарошечных долот. В 1980 г. А.Н. Поповым, Ю.И. Самоходовым, А.И. Спиваком, Б.Н. Трушкиным, С.В. Филиповичем и А.С. Юдиным было предложено новое техническое решение на вооружение шарошечного долота, на которое было получено авторское свидетельство "Шарошка бурового долота" (а.с. 825835). В этом решении были реализованы результаты исследования взаимодействия вооружения

долота с забоем скважины с учетом величины и направления скольжения зубьев. Была решена задача о совмещении максимального вектора реакции забоя с осью симметрии зуба. Это позволило уменьшить угнетающий эффект набегающей грани зубьев при разрушении горной породы, убрать растягивающие напряжения с набегающей грани зубьев и перенести на них наплавку твердого сплава. Испытания опытных долот показали существенное увеличение механической скорости бурения. Долота с такими шарошками под шифром 215,9С-ГН-3 были поставлены на серийное производство и изготавливались в течение десяти лет. Долото демонстрировалось на ВДНХ, а авторы получили соответствующие медали. В 1985 г. Б.Н. Трушкин, М.М. Абдуллин, А.Н. Попов, В.Г. Неупокоев и А.С. Юдин предложили техническое решение, на которое также получили авторское свидетельство "Шарошечное буровое долото" (а.с. 1180476). В решении были реализованы результаты изучения взаимного влияния расположения элементов вооружения в венцах на эффективность их работы. Было предложено групповое координированное расположение элементов вооружения в венцах шарошек вместо случайного равномерного их размещения в венцах. В настоящее время ни одно долото в мире не изготавливается с равномерным размещением зубьев в венцах. Это техническое решение в разной степени было использовано заводом ОАО "Волгабурмаш" при модернизации долот 269,9ТЗ-ГН-R20М, 215,9МС-ГН-R44М, 190,5МЗ-R61М и др. Названные технические решения были признаны важнейшими изобретениями года в области шарошечных долот [71].

Отдельного внимания заслуживает рассмотренная проблема относительного запаса вооружения для стального вооружения шарошечных долот. Данная проблема была рассмотрена группой ученых Уфимского Нефтяного Университета под руководством А.Н. Попова и затрагивала следующие вопросы:

- кинематика взаимодействия долота с горной породой;
- увеличение прочностных свойств вооружения шарошечных долот;
- режим работы шарошечного долота.

На основании методики расчета остаточного запаса вооружения по рядам, разработанной в Уфимском Нефтяном Институте проведен расчет относительного запаса вооружения для шарошечных долот в данной работе.

Конструктивные особенности, такие как параллельное смещение осей шарошек относительно оси долота и высокая агрессивность элементов вооружения (зубьев), негативно влияют на запас прочности. Также, установлено, что наименьшее значение относительного запаса вооружения наблюдается в области нейтрального сечения, где скалывающий эффект минимален, что приводит к укатыванию забоя с последующим образованием рейки, которая также негативно сказывается на эффективности разрушения горной породы. Основываясь на результатах научных работ сотрудников кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин» установлено, что проблема совершенствования стального вооружения актуальна и имеет верный вектор развития.

1.3 Обоснование применения шарошечных долот со стальным вооружением в верхних интервалах Восточной Сибири

Основной объем добычи углеводородов на территории Российской Федерации приходится на Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн. Основываясь на данных, приведенных компанией Deloitte за 2019 год, на него приходилось 58 % добычи углеводородов, 82 % эксплуатационного, и 55 % поисково-разведочного бурения на нефть и газ соответственно. Это связано с высокоразвитой материально – технической базой, освоенностью месторождений и разработанностью технологий по разработке и извлечению полезных ископаемых. Схематичные данные приведены на Рисунке 1.10.

В то же время, на Восточно-Сибирский нефтегазоносный бассейн за аналогичный период времени приходится порядка 9 % добычи углеводородов и 6 % эксплуатационного и 11 % поисково-разведочного бурения на нефть и газ соответственно. Важно отметить значительное превышение объемов поисково-разведочного бурения в данном регионе, что свидетельствует о наращивании темпов разработки нефтяных и газовых месторождений в данном регионе. Нефтеносность региона, в зависимости от источников, колеблется в 65-99 млрд т нефти, при этом регион в геологическом плане изучен достаточно слабо. Схематичные данные приведены на Рисунке 1.11.

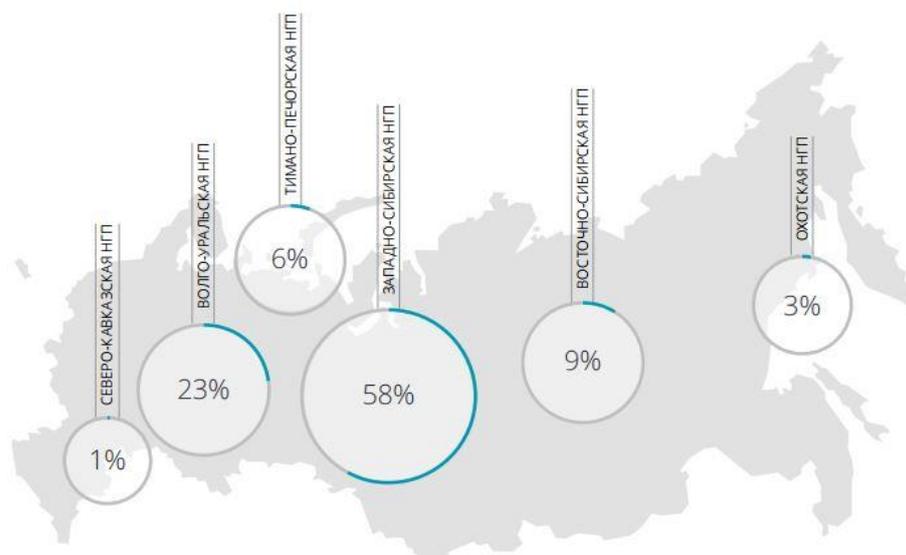


Рисунок 1.10 – Распределение добычи по нефтегазоносным провинциям за 2019 год (по данным компании Deloitte)

Важным показателем является зависимость прироста добычи нефти, которая требуется для оценки перспектив дальнейшего развития региона. Установлено, что прирост добычи нефти в период 2009 – 2015 годов в Восточно-Сибирском регионе составил 2,4-11,3 % в зависимости от года при отрицательном росте -1,9 – 0,1 % в других нефтегазоносных провинциях [63,64].

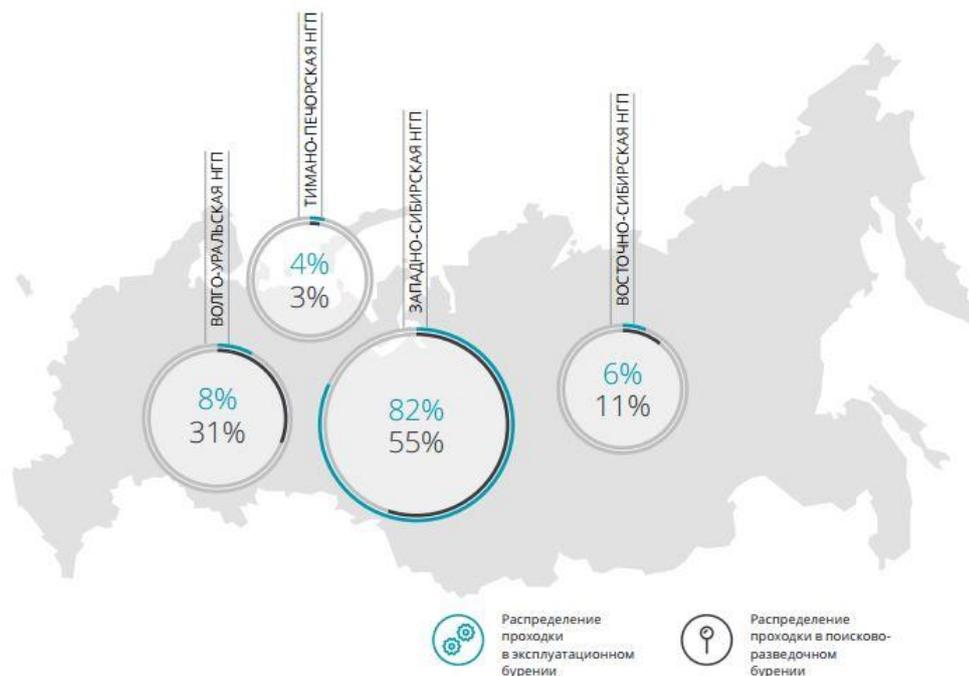


Рисунок 1.11 – Распределение бурения по нефтегазоносным провинциям за 2019 год (по данным компании Deloitte)

Добыча нефти и газа в Восточной Сибири осуществляется как на активно разрабатываемых месторождениях, таких как Ванкорское (Красноярский край), Верхнечонское (Иркутская область), Талаканское (республики Саха (Якутия)). Прирост нефтедобычи в Восточно-Сибирском регионе осуществляется за счет введения в промышленную разработку таких месторождений как Лодочное, Сузунское, Тагульское, Среднеботубинское, Куюмбинское, Ковыктинское.

Общая геологическая характеристика указанных выше месторождений следующая. Дорифейский фундамент, залегает на глубинах от 2–5 до 10–12 км. Продуктивен ряд комплексов: вендский преимущественно терригенный; венд-кембрийский глинисто-соляно-карбонатный с рифогенными образованиями, рифейский терригенно-карбонатный. Большинство месторождений заключено в венд-нижнекембрийских комплексах; крупные залежи установлены также в рифейском, с которым связываются весьма значительные перспективы. Повышенная битуминозность характерна для

кремнисто-глинисто-карбонатных пород венд-кембрийского разреза. Месторождения приурочены к антиклинальным ловушкам и рифовым массивам. Суммарно, в Восточно-Сибирском регионе открыто 74 месторождения нефти, газа, газоконденсата, приуроченных преимущественно к крупным положительным структурам: Непско-Ботуобинскому и Байкитскому сводам (на вершине последнего находится самое крупное Юрубчено-Тохомское месторождение нефти), Катангской седловине и др. Помимо рифейско-кембрийских, к перспективным относятся также ордовикско-пермские отложения в северных областях провинции [61].

Развитие нефтегазового комплекса основывается в первую очередь на проведении комплекса геолого-технических мероприятий, основой которых является строительство как поисково-разведочных, так и эксплуатационных скважин.

Разработка месторождений и добыча полезных ископаемых в данных горно-геологических условиях связана с осложнениями, такими как тектонические деформации, аномально низкие пластовые давления (АНПД), трещеноватость и кавернозность горных пород, низкие пластовые температуры. В геологическом разрезе присутствуют многолетнемерзлые горные породы, толщи солевых отложений, что при строительстве скважин может привести к осложнениям, оказывающим влияние на эффективность всего процесса разработки месторождений [61].

Ранее опубликованные работы, посвященные проблематике строительства скважин в Восточно-Сибирском нефтегазоносном провинции, позволяют выделить основные причины, негативно влияющие на качество строительства скважин:

- наличие трещеноватых и кавернозных пород, образующих зоны частичного или полного поглощения буровой промывочной жидкости;
- наличие зон многолетнемерзлых пород в верхних интервалах строительства скважины;

- наличие интервалов солевых отложений с высокой кавернозностью;
- низкая изученность горно – геологического строения месторождений, вызванная слабо развитой инфраструктурой и низкая плотность сетки скважин в данном регионе [40,41,61].

В данной работе процесс строительства скважины рассматривается со стороны эффективности применения породоразрушающего инструмента для его наиболее эффективного применения в условиях горно-геологического разреза Восточной Сибири.

Строительство скважины - наиболее трудоемкий и требующий значительного объема инвестиций процесс. Бурение занимает одно из ключевых мест во временной сетке строительства скважины, поэтому снижение времени бурения приводит к существенной оптимизации расходов. Снижение трудоемкости и увеличение технико-экономических показателей бурения скважин является актуальной задачей. Одним из способов снижения времени является увеличение эффективности работы породоразрушающего инструмента. Ввиду низкой степени изученности строения горных пород в Восточно-Сибирском регионе, в частности на Ванкорском месторождении, были составлены как групповые рабочие проекты, так и индивидуальные рабочие проекты для строительства скважин, в которых бурение верхних интервалов предполагалось долотами с резцами PDC.

Ванкорское нефтегазовое месторождение было открыто в 1988 году и расположено на двух лицензионных участках, находящихся в разных регионах: Ванкорская площадь – в Турханском районе Красноярского края и Северно-Ванкорская площадь в Дудинском районе Таймырского автономного округа. Согласно схеме нефтегеологического районирования Приенисейской части, Ванкорское месторождение расположено в пределах Пур-Тазовской нефтегазоносной области.

В тектоническом плане Ванкорское месторождение расположено в южной части Большехетской структурной террасы, являющееся замыканием

Надым-Тазовской синеклизы. На месторождении промышленно-нефтеносными пластами являются песчаные пласты Яковлевской и Нижнехетской свит, рассматриваемые как отдельные объекты разработки [83].

При обработке данных типов долот при бурении условно вертикальных интервалов под кондуктор (30-620 м) и кондуктор (620-1818 м) был получен преждевременный износ вооружения. Механические свойства горных пород по свитам представлены на Рисунке 1.12.

Индекс стратиграфического подразделения	Интервал, м		Краткое название горной породы	Плотность, г/см ³	Пористость, процент	Проницаемость, мдарси	Глинистость, процент	Карбонатность, процент	Твердость, кгс/мм ²	Расслоенность породы	Абразивность	Категория породы промысловой классификации (мягкая, средняя и т.п.)
	от (верх)	до (низ)										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Q	0	105	супеси	1,5	30-35	500	10	0	< 5	1	6	мягкая
			сутлиники	1,8	25-30	10	90	0	< 5	2	4	мягкая
			пески	1,5	30-35	500	5	0	< 5	1	6	мягкая
			глины	2,0	25-30	0	95	0	< 5	2	4	мягкая
K ₂ tn	105	515	алеуриты	2,0	10-15	10	55	0	10	2	4	мягкая
			пески	1,8	30-35	500	5	0	5	1	10	мягкая
K ₂ sp	515	570	глины	2,2	10	0	95	0	10	2	4	мягкая
			алеуриты	1,9	10-15	300	25	3	10	2	5,5	мягкая
K ₂ ns	570	900	алеуриты	1,9	10-15	300	30	2	10	2	5	мягкая
			глины	2,0	5	0	95	0	10	2	4	мягкая
K ₂ dr	900	1025	глины	2,2	5	0	100	0	10	4,2	4	мягкая
			алеуриты	2,0	12	50	40	8	10	2	5	мягкая
K ₁ dl	1025	1255	песчаники	1,9	25	100-500	5	до 15	20	1,3	10	мягкая
			алеуролиты	2,2	12	20-50	35	5	15	3	6	мягкая
			аргиллиты	2,2	10	0	95	3	20	4,2	4	мягкая
K ₁ jak	1255	1869	угли	1,3	5	0	5	0	15	1	4	мягкая
			глины	2,2	5	0	100	3	10	4,2	4	мягкая
K ₁ mch	1869	2033	аргиллиты	2,3	10	0	95	3	35	3	6	средняя
			алеуролиты	2,0	12	20-50	25	2	30	3	4	средняя
			песчаники	1,9	35	200-1000	3	15	30	1,3	6,5	средняя
			песчаники	2,0	35	200-1000	3	15	30	2	6,5	средняя
			алеуролиты	2,2	12	20-50	25	2	30	3	4	средняя
K ₁ cd	2033	2610	аргиллиты	2,4	10	0	95	3	35	4,2	4	средняя
			песчаники	2,3	25	200-1000	5	15	40	2	6,5	средняя
			алеуролиты	2,4	12	20-50	25	1	35	3	4	средняя
K ₁ nch	2610	2839	аргиллиты	2,4	10	0	95	3	50	4,2	4	средняя
			аргиллиты	2,5	10	0	95	5	80	3	4	средняя
			алеуролиты	2,4	12	20-50	25	10	60	3	5	средняя
			песчаники	2,5	30	100-910	5	до 23	80	1,5	6,5	средняя

Рисунок 1.12 – Механические свойства горных пород по свитам из ГРП №605 (выдержка)

Конструкция скважины представлена выдержкой из группового рабочего проекта №605 на строительство эксплуатационных скважин на Ванкорском месторождении на Рисунке 1.13.

Индекс стратиграфического подразделения	Интервал, м		Горная порода		Стандартное описание горной породы: полное название, характерные признаки (структура, текстура, минеральный состав и т.п.)
	от (верх)	до (низ)	краткое название	% в интервале	
1	2	3	4	5	6
Q	0	75	супеси суглинки пески глины	25 25 25 25	<i>Пески, глины, супеси, суглинки</i> с редкой галькой изверженных пород. Имеют место межледниковые и ледниковые отложения в виде валунно-галечниковых, моренных образований.
K ₂ tn	75	505	алевриты пески глины	50 25 25	<i>Алевриты</i> светло-серые, слоистые с прослоями <i>песков</i> серых, желтовато-серых, плотных, мелкозернистых, глинистых и <i>глин</i> темно-серых, зеленовато-серых.
K ₂ sp	505	540	глины алевриты пески	70 20 10	<i>Глины</i> темно-серые, зеленовато-серые с прослоями <i>алевритов</i> светло-серых, слоистых и <i>песков</i> серых, желтовато-серых, плотных, мелкозернистых, глинистых.
K ₂ ns	540	905	алевриты пески глины	50 25 25	<i>Алевриты</i> серые, серо-зеленые плотные с прослоями <i>песков</i> серых и <i>глин</i> темно-серых.
K ₂ dr	905	1000	глины алевриты	80 20	<i>Глины</i> темно-серые, с зеленоватым оттенком, алевритистые, <i>алевриты</i> серые, зеленовато-серые, прослоями глауконитовые.
K ₁ dl	1000	1350	песчаники алевролиты аргиллиты	45 30 25	Чередование <i>песчаников</i> серых, светло-серых, разнозернистых, кварцполевошпатовых, косослоистых с <i>алевролитами и аргиллитами</i> зеленовато-серыми, кварцполевошпатовыми реже аркозовыми.
K ₁ jak	1350	1700	песчаники аргиллиты алевролиты угли	35 35 25 5	Неравномерное переслаивание <i>песчаников</i> серых, желтовато-серых, мелкозернистых с прослоями углистых аргиллитов, <i>аргиллитов</i> темно-серых, зеленовато-серых тонкослоистых, плитчатых и <i>алевролитов</i> серых тонкозернистых, плотных, массивных. Встречаются прослой <i>углей</i> бурых.

Рисунок 1. 13 – Литологическая характеристика из ГРП №605 (выдержка)

Интервал бурения от 30-620 м проводился компоновкой:

БИТ-393,7В419 ТСР + 1ТСШ-240 + КЛС-393,7 (1,13м) + УБТ-203 (47,5м) + УБТ-171 (37,8м) + ОК (0,43м) + СБТ-127-ост.; код IADC – S223.

Незапланированная спускоподъемная операция осуществлена по причине падения механической скорости с 30 м/ч до 1 м/ч при бурении одной свечи, т.е. падение механической скорости носило экспоненциальный характер. Общая наработка на долото составила 21 час. При осмотре долота был выявлен преждевременный аварийный износ. Падение механической скорости проходки произошло из-за износа плечевого вооружения долота. Фотографии долота приведены на Рисунке 1.14.

Несмотря на то, что по литологическим данным групповых рабочих проектов на строительство скважин, основанным на анализе поисково-разведочных и оценочных скважин наличие обломочных валунно-галечных отложений предусматривается в малых интервалах от 0 до 75 м, на практике

столкнулись с тем, что разрез осложнен валунно-галечными включениями до глубин до 400-450 м. Характер износа представляет собой первичное образование сколов на PDC резцах в областях, совершающих максимальную работу с последующим разрушением резцов и потери диаметра долота. Такой износ вышеуказанное долото получило по двум причинам:

- наличие в интервале бурения высоко абразивных песчаников и иных обломочных горных пород, таких как галечник, который встречается в виде окремнелых пропластков в относительно мягкой горной породе и приводит к ударному воздействию на вооружение породоразрушающего инструмента;

- прохождение возможных зон поглощений буровой промывочной жидкости со сниженными расходами буровой промывочной жидкости и как следствие ухудшением охлаждения вооружения долота.



Рисунок 1.14 – Долото БИТ 393,7 В419 со следами катастрофического износа

Данный характер износа, сопровождающийся выходом породоразрушающего инструмента из строя и внеплановыми спускоподъемными операциями, наблюдается на многих объектах в данном регионе проведения работ. Учитывая этот факт, установлено, что долота режуще-скалывающего типа не подходят для бурения скважин Ванкорского месторождения на глубинах 30-1800 м, так как данный интервал насыщен обломочными породами, галечником (валунами), песками.

При определении критерия выбора типа породоразрушающего инструмента для применения в данном горно-геологическом разрезе определяется показатель рейсовой скорости и стоимости одного метра проходки в указанном интервале проведения буровых работ. Рациональным типом долота признается тот, который обеспечивает минимальную стоимость метра проходки [14].

В настоящее время основная область применения долот PDC бурение однородных мягких, средних и абразивных горных пород. За счет использования различных опций имеются успешные применения в крепких и трещиноватых породах. Но массовое коммерческое применение PDC долот в габаритах 295,3-444,5 мм остается нецелесообразным по причине высокой стоимости долот при ограниченной экономической целесообразности от их применения.

Для работы в таких горно-геологических условиях рационально использовать шарошечные долота, при условии наличия ресурса шарошечного долота, обеспечивающее гарантированное прохождение интервала под направление или кондуктор за одно долбление, без выполнения дополнительных спуско – подъемных операций с максимальной скоростью проходки. Преимущество использования шарошечных долот заключается в принципиально ином способе разрушения горной породы в совокупности с отсутствием достаточно прочных, но хрупких, не рассчитанных на ударное воздействие резцов PDC. Эксплуатация

шарошечных долот также не зависит критическим образом от создаваемого расхода буровой промывочной жидкости. Применение шарошечных долот со стальным вооружением позволит сохранить значения механической скорости проходки на высоком уровне, сопоставимом с PDC – долотами.

1.5 Выводы по главе 1

1. Рассмотрены проблемы эксплуатации шарошечных долот со стальным вооружением, выделены ключевые достоинства и недостатки применения шарошечных долот, в том числе обозначены основы кинематики взаимодействия вооружения шарошечных долот с забоем в зависимости от твердости горных пород.

2. Обозначена актуальность применения шарошечных долот в Восточно-Сибирской нефтегазоносной провинции в связи с неоднородностью горно-геологического строения и наличием валунно-галечных отложений в массиве мягких горных пород.

3. Проведен обзор существующих решений, направленных на совершенствование шарошечных долот со стальным вооружением, показавший, что необходима разработка технических решений для успешного применения шарошечных долот при осложнении разреза валунно-галечными отложениями.

4. Сформулирована цель работы, заключающаяся в увеличении показателей работы шарошечных долот для бурения мягких горных пород, осложненных валунно-галечными отложениями за счет усиления внутренних рядов вооружения с разработкой методики применения шарошечных долот при осложнении разреза валунно-галечными отложениями.

2 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗНОСА СТАЛЬНОГО ВООРУЖЕНИЯ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

2.1 Анализ причин выхода из строя шарошечных долот

Для выбора правильного и актуального направления модернизации, как шарошечного долота, так и области его применения необходимо выявить ключевые причины, по которым происходит вывод из эксплуатации (отказ) шарошечных долот. Под отказом в данном случае понимается потеря работоспособности долота, которая возникла в результате износа одного из ключевых узлов шарошечного долота.

Был проведен анализ промысловых данных, собранных при отработке шарошечных долот производства ООО НПП «БУРИНТЕХ» на территории нескольких десятков месторождений России и ближнего зарубежья. Предметом анализа стали фотоотчеты более чем по 1300 рейсам, собранные сервисными инженерами ООО НПП «БУРИНТЕХ» с 2018 по 2021 год. Из фотоотчетов был выделен следующий массив данных: информация о годности или негодности долота для дальнейшего использования и причина отбраковки долота. В ходе анализа было проведено ранжирование причин отказов шарошечных долот по частоте их возникновения.

Изначально был проведен анализ материала, в результате которого были выделены основные причины отказов шарошечных долот:

- 1) износ вооружения шарошек;
- 2) размыв элементов долота;
- 3) нарушение герметичности опоры;
- 4) достижение допустимой наработки на долото;
- 5) другие причины.

Под допустимой наработкой на шарошечное долото понимается достижение максимальных, эмпирически установленных для каждого

габарита шарошечных долот значений. Это выражается в часах циркуляции или в оборотах долота (т.н. тысячи оборотов долота, Krevs), после которых эксплуатация шарошечного долота имеет непредсказуемый характер, но на момент извлечения долота из скважины следов, за исключением естественного износа вооружения (WT по классификации кодов износа вооружения IADC для шарошечных долот) нет.

К другим причинам относятся причины отбраковки не связанные с состоянием долота, или редко встречающиеся причины отказов, такие как изворот роликов, перегрузка подшипника, слом ниппеля, или лапы. Все эти отказы связаны, как правило, с грубыми нарушениями рекомендованного процесса эксплуатации, дефектами металла, конструкторским и производственным браком. Их доля достаточно мала для любого типоразмера долот, чтобы не учитывать эти причины по отдельности.

По мере сортировки данных стали явно заметны серьезные различия в причинах отказов долот различных типоразмеров. В подавляющем большинстве случаев различия оказались связаны с габаритными размерами долота, а значит и опоры. Поэтому было решено провести анализ по следующим группам диаметров долот, внутри которых используется одна и та же опора:

- 1) 114,3 - 127,0 мм (488 долот, в т.ч. 184 со стальным вооружением);
- 2) 139,7 - 155,6 мм (197 долот, в т.ч. 81 со стальным вооружением);
- 3) 190,5 - 222,3 мм (211 долот, в т.ч. 69 со стальным вооружением);
- 4) 295,3 - 311,1 мм (266 долот, в т.ч. 197 со стальным вооружением);
- 5) 393,7 - 444,5 мм (105 долот, в т.ч. 81 со стальным вооружением);
- 6) 490,0 – 558,0 мм (65 долот в т.ч. 36 со стальным вооружением);
- 7) 584,2 – 660,4 мм (13 долот в т.ч. 9 со стальным вооружением).

Долота других диаметров используются значительно реже, так что анализ их отказов не может иметь достаточную достоверность. В Таблице 2.1

приводятся результаты статистического анализа по каждой из перечисленных групп, выраженные в процентах от общего количества долот внутри группы.

Таблица 2.1 – Результаты анализа причин выхода из эксплуатации шарошечных долот

№	Габарит долота, мм	Причина вывода из эксплуатации, %				
		1	2	3	4	5
1	114,3 - 127,0	7,35	1,31	9,67	77,66	4,01
2	139,7 - 155,6	6,77	1,94	8,04	79,6	3,65
3	190,5 - 222,3	2,17	0,18	3,41	93,05	1,19
4	295,3 - 311,2	10,16	0,37	2,69	84,64	2,14
5	393,7 - 444,5	5,11	0,46	2,64	90,91	0,88
6	490,0 – 558,0	4,44	0,57	2,88	91,44	0,67
7	584,2 – 660,4	3,15	0,63	2,13	93,38	0,71
8	Ср. значение по столбцам	5,59	0,78	4,46	87	1,89

Общая тенденция такова, что большая часть долот дорабатывается только до допустимой наработки, чтобы снизить риск возникновения аварии на скважине по причине катастрофического износа шарошечных долот. Допустимая наработка индивидуальна не только для каждого диаметра шарошечного долота, но и для площади, в которой производится его отработка, поэтому говорить о конкретных значениях невозможно. Данный параметр является усредненным и для габарита 114,3-127,0 мм равен 60 ч циркуляции.

Также наблюдается зависимость снижения общего количества отказов по причине потери герметичности подшипникового узла при увеличении диаметра, так как опора и, соответственно, резинотехнические уплотнительные элементы становятся больше и имеют больший остаточный ресурс. В дополнение к этому важно отметить, что бурение в малых

габаритах сопровождается увеличенной нагрузкой на подшипниковый узел по причине больших глубин, и соответственно больших дифференциальных давлений на подшипниковый узел. Бурение характеризуется высокими оборотами за счет вращения бурильной колонны и забойного двигателя. Эти факторы в совокупности влияют на достаточно высокий процент отказов по причине потери герметичности подшипникового узла.

Размыв элементов шарошечного долота связан с применением форсированных режимов эксплуатации шарошечных долот на повышенных расходах буровой промывочной жидкости для достижения максимальной производительности и выноса шлама. Это приводит к размыву промывочных каналов и эрозионному размыву тел шарошек, что усугубляется при увеличении содержания абразивных частиц в буровой промывочной жидкости. Размыв элементов шарошечных долот, а также причины отказа, выделенные в группу «другие причины» имеют относительно малое количество и не влияет на общую картину эксплуатации шарошечных долот.

Особое внимание необходимо уделить такому типу износа, как износ вооружения шарошек шарошечного долота. Такие результаты исследований связаны с тем, что в малых габаритах, от 114,3 – 127,0 мм шарошечные долота применяются для бурения твердых, твердых абразивных пропластков, что усугубляет износ вооружения.

Повышение доли долот, отбракованных по состоянию вооружения, возрастает с увеличением диаметра долота. Это объясняется тем, что для больших диаметров долот обеспечение высокой надежности опоры и уплотнительного узла значительно упрощается, в связи с увеличением пространства для размещения крупногабаритных узлов. Также это объясняется увеличением доли стального вооружения для бурения верхних секций скважины, и более щадящими режимами работы при их бурении.

В габарите 295,3 - 311,2 мм и 393,7 - 444,5 мм высокий процент износа вооружения шарошечных долот объясняется условиями эксплуатации долот

конкретным заказчиком, потребляющем большую долю долот диаметром 295,3 – 444,5 мм. Потребление обусловлено применением шарошечных долот со стальным вооружением при вводе в эксплуатацию ряда месторождений в Восточно-Сибирском регионе при бурении интервалов под кондуктор и техническую колонну, где из-за геологических особенностей в совокупности с требованиями компании недропользователя шарошечные долота эксплуатировались на режимах, близких к аварийным.

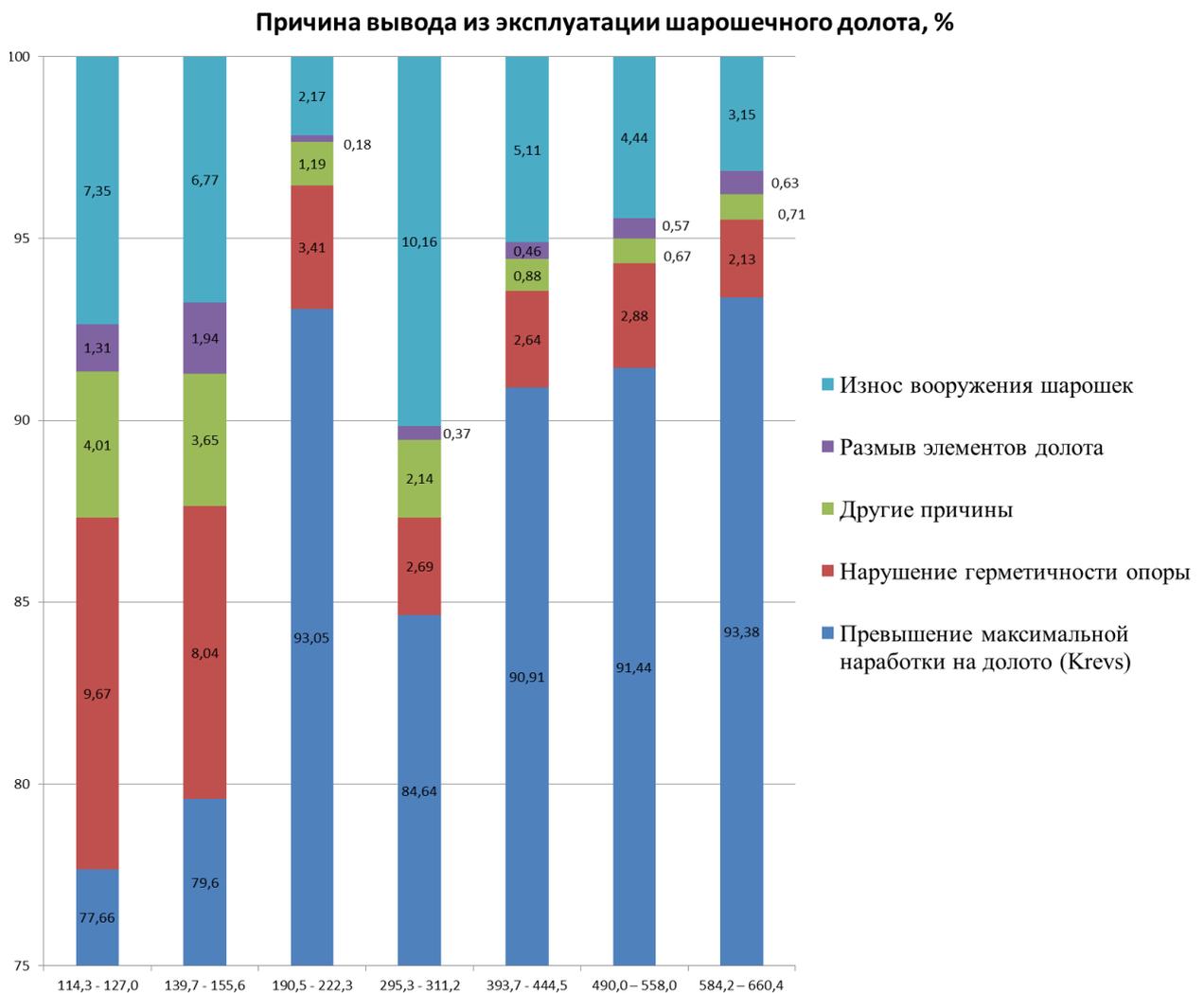


Рисунок 2.1 – Причины вывода из эксплуатации шарошечных долот за 2018-2021 г

Из анализа можно отметить, что статистические данные укладываются в общую картину эксплуатации шарошечных долот. На данном этапе применения шарошечных долот выделяются из общей тенденции шарошечные долота в габарите 295,3 – 311,1 мм со стальным вооружением шарошек. Учитывая перспективу развития бурения в Восточной Сибири, данное направление модернизации шарошечных долот является крайне актуальным. Таким образом, повышение ресурса вооружения и адаптация режимов бурения могли бы повысить ресурс всех шарошечных долот, начиная с габарита 295,3 мм и выше. Это говорит о важности проведения научно-исследовательских изысканий в этом направлении. Результаты анализа промысловых данных, приведенные на Рисунке 2.1, наглядно демонстрируют, что на данном этапе эволюции шарошечного долота ресурс стального вооружения ниже ресурса опоры шарошечных долот. Это утверждение справедливо для всех долот диаметром 295,3 мм и выше, а они составляют примерно 35 % производимых в России шарошечных долот, и с каждым годом количество долот больших диаметров неуклонно растет. Это подтверждает правильность выбора стального вооружения шарошечного долота для модернизации в качестве направления данной научно-исследовательской работы и показывает ее важность для отечественного и мирового нефтесервисного сектора.

2.2 Анализ адекватности полученных экспериментальных данных

На основании опытно-промысловых данных по причинам отказов шарошечных долот проведен анализ адекватности полученных данных методом полнофакторного эксперимента (ПФЭ) для оценки адекватности данных. ПФЭ проводится для группы долот в габарите от 295,3-311,1 мм.

Зависимость числа опытов от числа уровней факторов принимает вид:

$$N=2^k, \quad (2.1)$$

где k – число факторов.

$$N=2^3=8. \quad (2.2)$$

Все возможные комбинации значений для 3-х факторов, варьируемые на двух уровнях, будут укладываться в восемь опытов. Рассмотрим зависимость потери работоспособности долота от таких факторов (остальные факторы влияния являются следствием трех переменных):

- износ вооружения шарошек (x_1);
- размыв элементов долота (x_2);
- нарушение герметичности опоры (x_3).

$$V = f(x_1, x_2, x_3). \quad (2.3)$$

Опытные работы проводили варьированием переменных x_1 , x_2 и x_3 . Каждую из переменных варьировали на двух уровнях (верхнем и нижнем), условно обозначенных символами $+1$ и -1 . Интервал варьирования – некоторое число, прибавление которого к основному уровню дает верхний, а вычитание – нижний уровни фактора. Основной уровень - исходная точка для построения плана эксперимента. Построение плана эксперимента - выбор экспериментальных точек, симметричных относительно нулевого уровня в Таблице 2.2. Матрица планирования ПФЭ приведена в Таблице 2.3 [29,30].

Таблица 2.2 – Интервалы варьирования независимых переменных

Значения	x_1	x_2	x_3
Основной уровень	10,16	0,37	2,69
Интервал варьирования	8	0,3	2
Верхний уровень ($x_i = +1$)	18,16	0,67	4,69
Нижний уровень ($x_i = -1$)	2,16	0,07	0,69

Таблица 2.3 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Матрица планирования								Рабочая матрица			Результаты опытов	Среднее \bar{Y}_i , Г
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3		
1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	18,16	0,67	0,69	84,64	84,64
2	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	2,16	0,67	0,69	85,14	85,14
3	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	18,16	0,07	0,69	88,36	88,36
4	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	2,16	0,07	0,69	89,24	89,24
5	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	18,16	0,67	4,69	88,74	88,74
6	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	2,16	0,67	4,69	85,45	85,45
7	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	18,16	0,07	4,69	82,33	82,33
8	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	2,16	0,07	4,69	83,67	83,67

После проведения опытов выполняем статистическую обработку результатов. Определяем ошибки повторных опытов. Среднеквадратичное отклонение определяем по формуле (2.4). Расчеты сводим в Таблицу 2.4.

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (Y_i - \bar{Y})^2, \quad (2.4)$$

где \bar{Y} – среднее арифметическое значение параметра оптимизации, т.к. приводится для одного серии опытов, $n=1$ (значения по Таблице 2.3).

Таблица 2.4 – Значения среднеквадратичных отклонений

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
S_i^2	9274	9432	10287	10564	10391	9574	8993	9307
S_i	96	97	101	102	101	97	94	96

Для определения брака используем критерий Стьюдента

Его значение с доверительной вероятностью 0,90 равно 6,31

Вычисляем дисперсию выходного параметра:

$$S^2(Y) = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (Y_i - \bar{Y})^2}{N \cdot (n - 1)} = \frac{\sum_1^N S_i^2}{N} =$$

$$= \frac{9247 + 9432 + 10287 + 10564 + 10391 + 9574 + 8993 + 9307}{56} = 1391$$

Проверку однородности дисперсий выполняем по критерию Фишера.

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{S_{\text{min}}^2} = \frac{S_1^2}{S_4^2} = \frac{10562}{8993} = 1,17 \quad (2.5)$$

Число степеней свободы $F_{\text{табл}} = 2,7055$, при этом расчетное значение меньше табличной постоянной, значит дисперсии однородны.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (2.6)$$

Определим коэффициенты регрессии. Для экспериментального плана, обладающего оптимальными свойствами, коэффициенты модели находятся по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^n Y_u, \quad (2.7)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot Y_u, \quad (2.8)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot Y_u, \quad (2.9)$$

$$b_{ijk} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot x_{ku} \cdot Y_u, \quad (2.10)$$

где i - номера рассматриваемых факторов,

j - номера рассматриваемых факторов,

k - номера рассматриваемых факторов,

u - номер параллельного опыта,

n - число параллельных опытов.

Находим коэффициенты регрессии:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= 85,946, \\
 b_1 &= 0,071, \\
 b_2 &= 0,046, & b_{13} &= 0,416, \\
 b_3 &= -0,899, & b_{23} &= 2,001, \\
 b_{12} &= 0,626, & b_{123} &= 0,531.
 \end{aligned}$$

С учетом значения дисперсии воспроизводимости $S^2(Y) = 1391$ и с доверительной вероятностью 0,90 находим границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии.

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot S(Y)}{\sqrt{N}} = \pm 0,594 \quad (2.11)$$

Сравнивая значения коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов, видно, что коэффициент b_{23} , незначим и их решено исключить. Уравнение регрессии принимает вид:

$$\hat{y} = 85,946 - 0,899 \cdot x_3 + 0,626 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,001 \cdot x_1 \cdot x_3 \quad (2.12)$$

Проверяем адекватность полученного уравнения. Рассчитаем дисперсию адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{f} \cdot \sum_{u=1}^N (\bar{Y}_u - \hat{Y}_u)^2 = \frac{1}{f} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta y_i^2 \quad (2.13)$$

$$S_{\text{ад}}^2 = 3504,5$$

где $f = N - (k + 1)$ – число степеней свободы.

Адекватность модели определяем по критерию Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2(Y)} = \frac{3504,5}{1391} = 2,51 \quad (2.14)$$

$F_{\text{табл}} = 10.13$. $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$, следовательно, модель адекватна.

Физический смысл полученных данных позволяет говорить о том, что, соотношение показывает взаимосвязь между параметрами, которые характеризуют износ шарошечных долот по трем параметрам. В данном случае на параметр оптимизации перечисленные факторы влияют пропорционально, и на это указывают линейные эффекты. Адекватность модели указывает на достоверность выборки данных, на основании которых был проведен статистический анализ причин выхода из эксплуатации шарошечных долот.

2.3 Анализ горно-геологических условий применения шарошечных долот

Применение шарошечных долот в Восточно-Сибирском регионе обусловлено применением при строительстве секции под кондуктор и технические колонны на ряде месторождений, схожих в по горно-геологическому строению верхних интервалов, т.е. интервалов до 1000 м по вертикали. Геология приведена на примере Ванкорского месторождения с поинтервальным описанием разреза (Меловая система и Четвертичные отложения).

Меловая система (Верхний отдел - K2):

Дорожковская свита (K2t1) по всей площади Енисей-Хатангского прогиба и Пур-Тазовской области залегания углеводородов является региональной покровной. Горные породы характеризуются темно-серыми аргиллитами с незначительными интервалами серых и зеленовато-серых

алевролитов. На нижележащих отложениях долганский свиты они залегают согласно. Толщина отложений 70- 78 м.

Насоновская свита (K2t2-st) отличается песчаниками и алевролитами. Основной состав свиты — алевролиты, в кровельной и подошвенной частях наблюдается наличие песчаника по разрезу. Алевролиты серые, серо-зеленые, с подчиненными прослоями глин, темно-серых, вязких. Песчаники зеленоватосерые, мелкозернистые на глинистом цементе. Толщина свиты 310-350 м.

Салпадаяхинская и танамская свиты (K2kr-m) залегают в разрезе верхнего мела и насыщены глинами темно-серыми, с прослоями алевролитов светло-серых, слюдистых, со стяжениями известковистых алевролитов, и песков серых, плотных, мелкозернистых, глинистых. Мощность отложений 467-530 м.

Четвертичная система (Q) характеризуется континентальными отложениями, залегающими на размытой поверхности мезозойских отложений. Состоят из суглинков серого, светло-серого цвета с желтоватым оттенком, с многочисленными включениями гальки, гравия, валунов изверженных пород и кварцитов, супесями, песками. Толщина отложений до 250 м. При этом включения гальки и иных включений могут встречаться на глубинах до 600 м в виде пропласков толщиной до 25-30 м [83,84,95].

Эксплуатация шарошечных долот происходит в отложениях салпадаяхинской и танамской свит, а также в области четвертичных отложений. Насыщение валунно-галечными отложениями (преимущественно полимиктными) наиболее выражено именно в четвертичных отложениях и верхних интервалах верхнего мела, до глубины 500 - 600 м. Валунно-галечные включения представляют собой пропластки мощностью до 15-20 м, сложенные отдельными слабосцементированными породами (Рисунок 2.2).

Разрез характеризуется глинисто-песчаными отложениями со значительным содержанием валуна и гальки. Размеры единичных элементов

горной породы, исследованной в качестве шлама с месторождения, достигали до 30 мм в диаметре и отличались неправильной слабо окатанной формой. Присутствуют элементы более мелкого гранулометрического состава.

Вооружение шарошечных долот получает износ основных рядов при прохождении на форсированных режимах через участки, насыщенные галечником, за счет заклинивания зубьев соизмеримыми с размерами зубьев галечниками и валунами. За счет этого наблюдается снижение остаточного ресурса вооружения, особенно в области нейтрального сечения, в которой относительный запас (износостойкость) минимален.



Рисунок 2.2 – Образец шлама – галечник с размерами до 30 мм

Также требует решения проблема с подбором наиболее сбалансированного режима бурения для недопущения получения преждевременного износа элементами вооружения основных рядов.

2.4 Исследование характера износа вооружения шарошечных долот

При эксплуатации породоразрушающего инструмента под действием внешних сил происходит его износ. Износ в шарошечных долотах может проявляться в ухудшении рабочих характеристик тех или иных элементов, в частности, для габарита шарошечных долот 295,3-444,5 мм наиболее актуальной проблемой, требующей комплексного научно-технологического решения, является износ стального вооружения. Под износом вооружения в данной работе подразумевается изменение геометрических и прочностных характеристик стальных зубьев, приводящее к снижению эффективности разрушения горной породы.

Для разработки эффективного решения по увеличению эффективности применения шарошечных долот требуется провести исследование природы возникновения и характера износа шарошечных долот. В связи с увеличением объемов бурения разведочных и эксплуатационных скважин в Восточно-Сибирском регионе на Ванкорском месторождении для бурения скважин применялись шарошечные долота БИТ 295,3 Z1RSJ (код IADC 117). Долота применялись для бурения интервала под кондуктор. Проектный забой утверждался в ходе выполнения геолого-технических мероприятий и отличался в зависимости от скважины. Каждое долото применялось на одной скважине, и на момент применения было без наработки. Применение данного типа долот обусловлено геологическим разрезом, преимущественно состоящим из песков крупно- и среднезернистых, кварцевых, глинистых, глин серых, вязких, включениями галечника. Данный геологический разрез относится к категории М, МС, но осложняется наличием включений галечника [27]. Результаты бурения первой группы скважин на Ванкорском месторождении приведены в Таблице 2.5. Из выборки исключены повторные применения долот, первоначально применявшиеся для добуривания интервалов, долота, применяемые со значительными отклонениями от

режимных параметров бурения. Данные долота эксплуатировались без отклонений от режимных параметров, указанных в долотной программе. Данные по режимам бурения приведены в Таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Результаты отработки долот на Ванкорском месторождении

Номер	Интервал, м		Проходка, м	Тб	Тц	V, м/ч	Код износа IADC	Проектный забой, м
	от	до						
2630	30	503	473	20,5	68,9	23,1	8-6-WT-A-E-IN-LN.NR-PP	739
2063	30	759	729	27,8	32,3	26,2	7-8-CT,BT-A-E-IN-NR-TD	759
2541	30	793	763	25,3	64,1	29,9	5-4-WT-A-E-IN-ER,NR-TD	793
1811	30	564	534	24,5	59,9	21,7	5-3-WT-N,A-E-IN-LN,NR-PP	620
2994	30	748	718	22,9	42,9	31,4	6-4-WT-A-E-IN-NR-TD	748
2629	30	661	631	20,1	58,2	31,3	6-7-WT-A-EEE-IN-FC-LOG	714
2449	30	623	593	24,6	39,1	24,1	2-2-WT-A-E-IN-LN,NR-TD	623
2657	30	647	617	19,2	54,3	32,1	6-4-WT, LN-A-E-IN-NR-BHA	753
3412	30	558	528	23,4	35,3	22,6	8-3-WT-A-E-IN-NR-PR	620
Среднее						26,9		

Таблица 2.6 – Соответствие режимных параметров

	G, т	P, атм	N, об/мин	Q, л/с
Плановый	2-25	до 200	180-200	38-46
Фактический	4-14	100-140	180-200	40-45

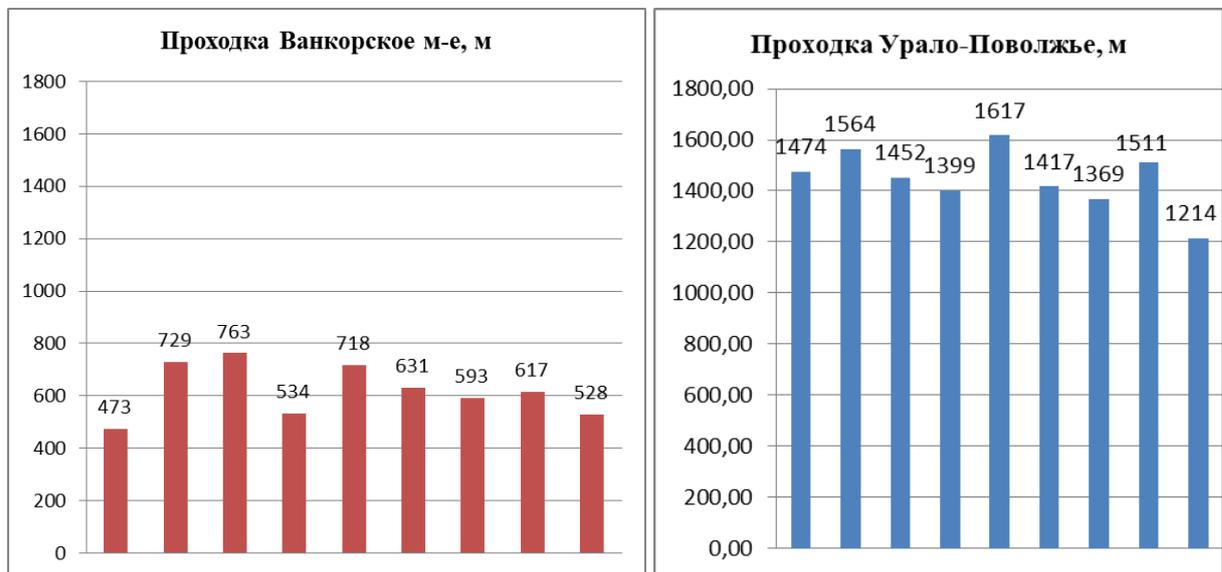


Рисунок 2.3 – Сравнительные данные по отработке

По имеющимся в таблице данным установлено, что износ шарошечных долот сопровождается в первую очередь износом стального вооружения,

который приводит к незапланированным спускоподъемным операциям (в 5 рейсах из 9), снижению механической скорости проходки. Ресурс опоры не вырабатывается полностью, т.к. для данного типа и диаметра долот максимальная безаварийная наработка на опору составляет 120 ч циркуляции.

Основываясь на опыте применения шарошечных долот БИТ 295,3 Z1RSJ (10 ед.) на месторождениях республики Татарстан в аналогичном геологическом разрезе мягких и мягко–средних горных пород было установлено, что инцидентов с катастрофическим износом стального вооружения не зафиксировано. Основная причина смены породоразрушающего инструмента – достижение гарантированной наработки на долото. Сравнительная характеристика по проходке на одно долото представлена на Рисунке 2.3.

Снижение ресурса долот в данном габарите в геологическом разрезе Ванкорского месторождения вызвано опережающим износом стального вооружения над износом остальных систем долота.

На основании вышеизложенного можно группировать износ стального вооружения шарошечных долот на 2 группы:

Первая группа - естественный износ вооружения, подъем не связан с потерей работоспособности вооружения долота;

Вторая группа - катастрофический износ вооружения, незапланированный подъем долота по причине потери работоспособности вооружения долота.

Износы первой и второй группы для стального вооружения имеют различные причины возникновения, и как следствие требуют различных подходов для их предотвращения:

Первая группа отличается следующим. В ходе попеременного контакта зубьев шарошек с горной породой происходит постепенное истирание объемного твёрдосплавного армирующего покрытия, и усиление области

износа за счет эрозионного размыва потоком буровой промывочной жидкости. Износ характеризуется равномерным течением, с плавным падением механической скорости при постоянных режимных параметрах, таких как нагрузка на долото и частота вращения долота. Падение скорости компенсируется проведением повторных drill-off тестов с подбором режима бурения. Возникает при правильном подборе типа породоразрушающего инструмента, который соответствует геологическим особенностям разрушаемой горной породы. Пример данного типа износа стального вооружения приведены на Рисунках 2.4.

Данный тип износа регламентируется кодом «WT – износ режущих элементов» по системе IADC и не превышает значения 1 – 2 по данной системе. Первопричиной разрушения стального зуба является выкрашивание и размывание твердосплавного покрытия. При этом износ стального зуба начинается с внешней стороны и направлен к оси шарошки.



Рисунок 2.4 – Износ стального вооружения группы 1

Для снижения вероятности возникновения износа данного типа требуется совершенствование армирующих твердосплавных материалов, которые должны обладать увеличенной адгезией твердосплавного покрытия

с основным материалом шарошки и отличаться повышенной ударостойкостью.

Аналогично первому типу износа, износ второго типа также возникает при перекачивании зубьев долота по забою, с первоначальным разрушением твердосплавного покрытия. Протекает такой износ по экспоненциальной зависимости. Это происходит по причине как потери армирующего покрытия тела шарошек, так, в основном, вследствие усталостного разрушения основного материала шарошек долота у основания стальных зубьев. Наблюдается получение такого износа при работе в особо тяжелых условиях, например, при бурении мягких и мягко-средних горных пород с валунно-галечными включениями, трещиноватых пород, переслаивании пород различной твердости. Такой тип износа встречается значительно реже, но именно он, зачастую, является причиной проведения незапланированных спускоподъемных операций при бурении. Характеризуется резким и стремительным падением механической скорости проходки за счет первичного слома зубьев, кратным увеличением нагрузки на близлежащие зубья. Подбор режимов бурения не приводит к восстановлению значений механической скорости проходки. Шарошечные долота с данным типом износа представлены на Рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 - Износ стального вооружения группы 2

При эксплуатации шарошечных долот на Ванкорском месторождении основное негативное влияние оказывают пропластки валунно-галечных отложений, которые в виду своей формы и геометрии имеют возможность, как заклинивать между зубьями шарошек, что при многократном повторении может приводить к их слому по телу зуба. Так, при входе в интервал, насыщенный валунно-галечными отложениями на высокой скорости проходки (до 50 м/ч) происходит динамическое ударное воздействие на зубья, приводящее к усталостному износу основного металла. Фрагменты поднятых зубьев приведены на Рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Шарошка со сломанными зубьями ряда 2

Потеря механической скорости проходки обуславливается снижением эффективности перекрытия забоя за счет потери стальных зубьев. При потере хотя бы одного зуба происходит кратное увеличение нагрузки и количества совершаемой работы на соседние зубья. Это приводит к дополнительной нагрузке соседних зубьев, что также снижает стойкость этих зубьев и приводит к последующему слому.

Как видно из Рисунка 2.8 (а), на котором приведена схема самоочистки для нового долота БИТ 295,3 Z1RSJ степень перекрытия забоя максимальна. Потеря хотя бы одного ряда зубьев, Рисунок 2.8 (б), на внутренних рядах приводит к снижению перекрытия забоя на 18-37% в зависимости от расположения потерянного ряда зубьев.

После подъема производится осмотр долота, который основывается на порядке описания износа по унифицированному коду по системе IADC. Для определения состояния режущей структуры (отдельно для калибрующего ряда и внутренних рядов) рассчитывается среднее значение по следующему алгоритму: если у долота со стальным вооружением в внутренних рядах было 25 зубьев, из них 4 сломаны, 2 наполовину сломались, а остальные изнашивались на 10%, то это будет соответствовать цифре 3, т.к. процент разрушенного вооружения: $((4*1+2*0,5+16*0,1)/25)*100\% = 26,4\%$, что соответствует цифре: $8*0,264 = 2,112 = 2$.

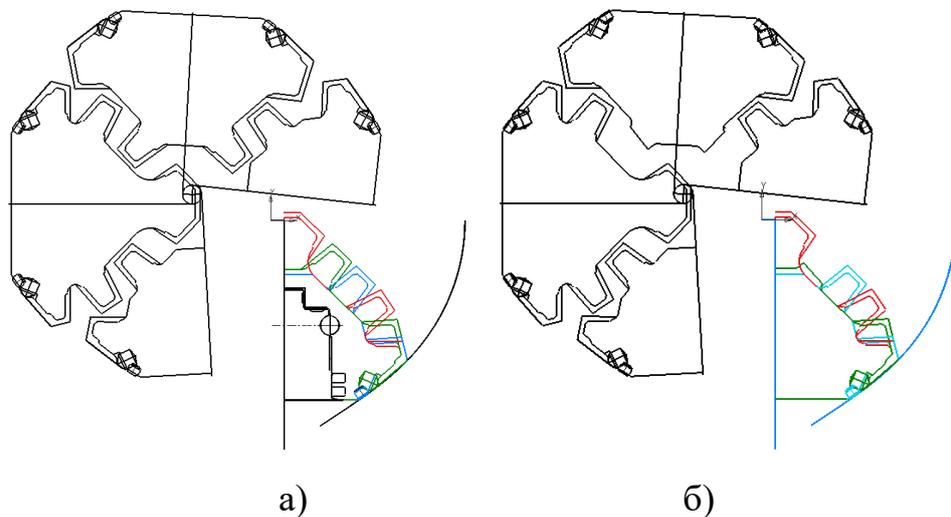


Рисунок 2.8 – Сравнительная схема самоочистки

При принятии решения о дальнейшем использовании, на основании унифицированного кода IADC, может быть принято ошибочное решение о возможности дальнейшего применения данного долота, несмотря на то, что имеются полностью отсутствующие зубья, и в осложненных горно-

геологических условиях это может привести к катастрофическому износу данного долота. Особенно данный аспект актуален при наличии износа, который в данном разделе определен ко второй группе.

С целью детализации износа вооружения для применяемых долот и корректной качественной оценки величины износа и относительного запаса вооружения проведен расчёт относительного запаса вооружения по рядам шарошечного долота БИТ 295,3 Z1RSJ U643 (IADC 117) по результатам отработки на Ванкорском месторождении (Таблица 2.5). Принимаем, что для нового долота запас вооружения по всем рядам является величиной постоянной и равной 100 %, т.к. вооружение долота не имеет признаков износа. Расчет осуществляется с учетом методики оценки износа IADC, с тем дополнением, что учитывается износ каждого ряда долота после отработки в идентичных горно-геологических условиях при одинаковых режимных параметрах, а величина относительного запаса вооружения рассчитывается как разница между начальным относительным запасом вооружения и полученным величиной относительного износа по ряду. То есть итоговым значением относительного запаса вооружения для каждого ряда является среднее значение запаса данного ряда по всей выборке оцениваемых долот.

Рассчитывается величина износа для единичного элемента вооружения определенного ряда:

$$n_i = \frac{x_i}{8}, \quad (2.15)$$

где n_i – величина износа для единичного элемента вооружения ряда;

x_i – относительный износ по шкале от 1 до 8 для единичного элемента вооружения;

i – количество единичных элементов вооружения в ряду.

Рассчитывается износ вооружения для выбранного ряда долота:

$$a_i = \frac{1}{k} \cdot \sum_1^n n_i * 100 \%, \quad (2.16)$$

где k – количество зубков выбранного ряда долота.

Далее проводится расчет среднего показателя износа вооружения для выбранного ряда долот, представленных в выборке оцениваемых долот:

$$\bar{a}_i = \frac{1}{y} \cdot \sum_1^y a_i, \quad (2.17)$$

где y – количество долот, представленных в выборке оцениваемых долот.

Далее рассчитывается непосредственно относительный запас вооружения для ряда:

$$f = f_0 - \bar{a}_i, \quad (2.18)$$

где $f_0 = 100 \%$ – относительный запас вооружения ряда нового долота.

Аналогичный расчет проводится для каждого ряда вооружения долот, приведенных в Таблице 2.5.

В целях обеспечения максимальной информативности, результаты сведены в гистограмму на Рисунке 2.7.

Рассчитанный по Формулам 2.15-2.18 относительный запас вооружения по рядам, в совокупности с аналитическим исследованием вывода из эксплуатации шарошечных долот, позволяет сделать вывод о том, что отказ шарошечных долот со стальным вооружением при бурении мягких и мягко средних горных пород, осложнённых валунно-галечными отложениями, возникает из-за опережающего износа зубьев внутренних рядов, а именно зубьев, находящихся в нейтральном сечении. Снижение относительного запаса вооружения наблюдается до 34%.



Рисунок 2.7 – Относительный запас вооружения БИТ 295,3 Z1RSJ U643
(IADC 117)

Для возможности эффективного применения шарошечных долот с сохранением высокого ресурса требуется увеличение стойкости стального вооружения. Это достигается путем увеличения ударной вязкости основного материала шарошек долота в совокупности с совершенствованием геометрии вооружения, основанной на кинематике движения долота на забое скважины. Изменение геометрии для усиления вооружения не должно приводить к снижению агрессивности вооружения и снижению механической скорости проходки. Взаимодействие шарошечного долота с массивом горной породы на забое носит динамический характер, так как именно вследствие ударных нагрузок возникает вышеуказанный слом зубьев. Способность основного материала - долотной стали, противодействовать динамическим (ударным) нагрузкам зависит от величины ударной вязкости стали. То есть требуется разработка стали со сбалансированными физико-механическими свойствами для обеспечения высокой износостойкости вооружения шарошечного долота,

как части системного подхода к повышению производительности бурения шарошечными долотами со стальным вооружением.

2.5 Исследование влияния износа стального вооружения шарошечных долот на эффективность бурения

Эффективность применения породоразрушающего инструмента зависит от режимных параметров бурения, таких как осевая нагрузка на долото, частота вращения долота и расход промывочной жидкости, на основании которых определяются ресурсные параметры:

- проходка на долото, выраженная в метрах проходки (м);
- наработка на долото, выраженная в часах циркуляции / бурения (Тц/Тб);
- механическая скорость проходки, рассчитываемая как отношение проходки (м) к времени бурения (ч).

На основании выборки данных по применению шарошечных долот при бурении секций под кондуктор на Ванкорском месторождении рассмотрена эффективность применения долот. Под эффективностью в данном случае понимается зависимость проходки (S) от времени бурения (Тб). На графике рисунка 2.9 показано, что 5 долот не достигли усредненного проектного забоя (первая вертикальная линия) по причине износа вооружения и, как следствие, падения механической скорости проходки. Также на основании групповых рабочих проектов установлено, что максимальная глубина кондуктора на данной площади может достигать 800 м (вторая вертикальная линия). Также в графике на Рисунке 2.9 пунктирной линией выделена прямая, которая характеризует эффективность применения шарошечных долот и определяет граничные условия:

- время бурения секции не должно превышать 20 ч;
- проходка на долото не менее 800 м;

- механическая скорость проходки должна быть не менее 40 м/ч.

Эффективность бурения напрямую зависит от способности породоразрушающего инструмента сохранять стойкость калибрующего и внутренних рядов вооружения под действием динамических нагрузок.

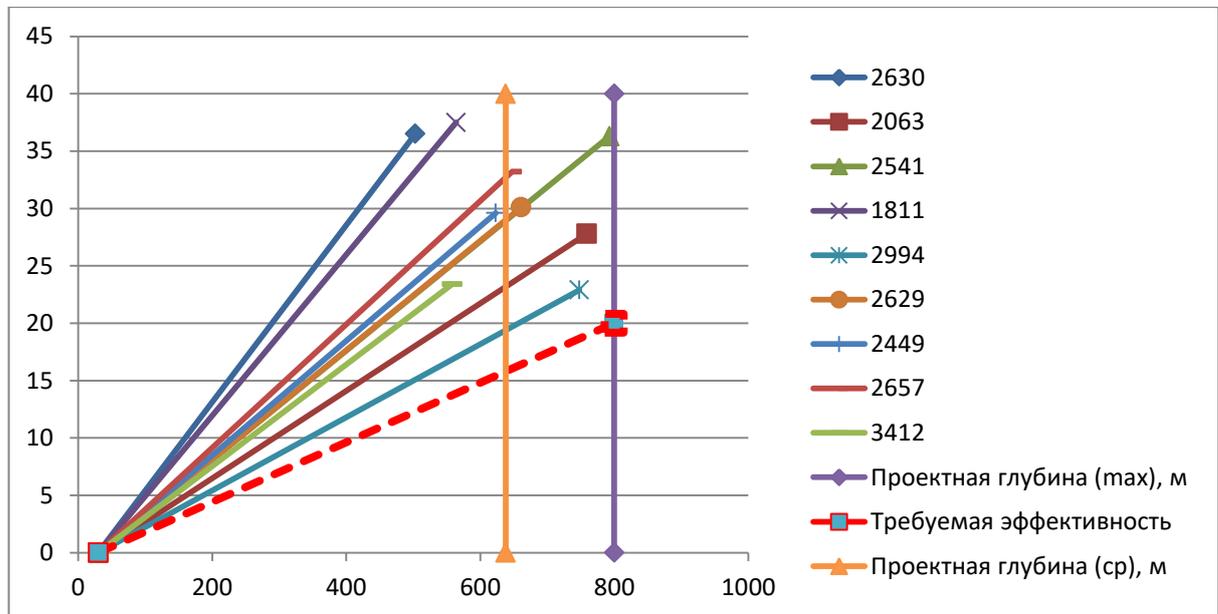


Рисунок 2.9 – График эффективности бурения

Для сопоставления режимных параметров и определения их влияния на механическую скорость проходки на примере отработки шарошечного долота БИТ 295,3 Z1RSJ №2063 на скважине 1102 куста 207 Ванкорского месторождения применялись данные со станции ГТИ (Рисунок 2.10). Установлено, что в результате увеличения нагрузки на долото до 14 т не происходит существенного роста механической скорости проходки, а с глубины 680 м происходит существенное снижение МСП. Наблюдается рост давления, который свидетельствует о дохождении нагрузки до забоя. Состояние долота после подъема соответствует коду износа IADC 7-8-СТ,ВТ-А-Е-IN-NR-TD.

Основываясь на данных хронологии отработки можно наблюдать значительное снижение скорости бурения в интервале 680 м. Т.е. Данные хронологии отработки и состояние долота коррелируются.

При отработке шарошечного долота БИТ 295,3 Z1RSJ №2994 на скважине 111 куста 4БИС Ванкорского месторождения наблюдается аналогичная проблематика, связанная с износом внутренних рядов основного вооружения шарошечного долота. Данные по хронологии отработки, подготовленные по замерам ГТИ, приведены на Рисунке 2.12. По ним наглядно видно, что после глубины 528 метров начинается снижение механической скорости проходки с 25 м/ч до 5 м/ч при увеличении осевой нагрузки на долото, которая не приводит к повышению МСП.



Рисунок 2.12 – Хронология отработки долота БИТ 295,3 Z1RSJ №2994

По фотографиям шарошечного долота БИТ 295,3 Z1RSJ №2994, которое до спуска было без наработки (Рисунок 2.13, а), установлено, что долото получило катастрофический износ внутренних рядов вооружения и не

пригодно для дальнейшей работы (Рисунок 2.13, б,в,г). При этом все секции данного долота сохранили герметичность. Фото приведены на Рисунке 2.13.



а)



б)



в)

Рисунок 2.13 – Состояние долота БИТ 295,3 Z1RSJ №2063

Внутренние ряды вооружения получили износ 75 %, при этом сохранен периферийный (калибрующий) ряд. Основному разрушению подверглись внутренние ряды вооружения, на которые приходится циклическая динамическая нагрузка, носящая ударных характер воздействия, приводящий к усталостному разрушению стальных зубьев долота.

В данной работе приведено детальное описание хронологии отработки для шарошечных долот БИТ 295,3 Z1RSJ №2994 и БИТ 295,3 Z1RSJ №2063. Долота, приведенные в Таблице 2.5, имеют аналогичные тип и характер износа.

Фактический горно-геологический разрез представлен песчаниками кварцевыми, светло-серыми, серовато-желтыми, средне-крупнозернистыми,

средней крепости, на глинистом цементе. Алевролит светло-желтый, мелкозернистый, средней крепости, на глинистом цементе. Глина темно-серая, бурая, вязкая. Наблюдаются наличие галечника (валунов) в верхних интервалах бурения от 30 до 500 м.

Учитывая тот факт, что основной массив горной породы сложен мягкими и мягко-средними горными породами, то для его бурения эффективнее применять стальное вооружение с меньшими углами заострения и меньшим количеством зубьев для обеспечения высокоэффективного разрушения горной породы. Установлено, что чем меньше величина угла заострения зуба, тем меньшая сила требуется для его внедрения в горную породу [20].

Соответственно, для увеличения скорости проходки требуется увеличить нагрузку на единицу площади зуба.

Допускается для увеличения стойкости вооружения применять более высокий код IADC (137-217) шарошечного долота. Но в данном контексте вышеуказанное предложение неэффективно по ряду причин. Уменьшение агрессивности, а именно увеличение угла заострения зуба и увеличение количества зубьев, приводит к снижению интенсивности внедрения зубьев в горную породу и, как следствие, негативно влияет на скорость проходки. Также, при применении шарошечных долот с более высоким кодом IADC за счет уменьшения величины смещения осей шарошек долота будет снижаться эффект проскальзывания долота, т.е. его скалывающая способность, которая в свою очередь, увеличивает эффективность разрушения породы в мягких и мягко – средних типах горных пород.

Основываясь на литологической характеристике района проведения работ, установлено, что основной массив по стволу скважины представляют собой мягкие и мягко – средние горные породы с низкой абразивностью.

Применение шарошечных долот с твердосплавным зубом в данном интервале является экономически неэффективным по причине значительного

снижения механической скорости проходки и отсутствия в интервале абразивных горных пород и пород с высокой твердостью (СТ, Т, К, ОК). Это обуславливается снижением удельной нагрузки на единичное вооружение при контакте с горной породой, а также менее агрессивной режущей структурой, в том числе вылетом зубьев в сравнении со стальным вооружением.

На основании проведенного детального разбора хронологии отработки и влияния износа стального вооружения на механическую скорость проходки подтверждены основные аспекты, влияющие на эффективность применения шарошечных долот:

1. Снижение скорости бурения после прохождения валунно-галечных отложений по стволу скважины после 530 м.

2. Первопричиной износа служит воздействие циклических динамических нагрузок на единичные элементы вооружения при прохождении породоразрушающим инструментом валунно-галечных отложений.

3. При подборе режимных параметров увеличение нагрузки не способствует увеличению МСП, так как эффективность разрушения горной породы снижается из-за значительного износа вооружения, соответственно уменьшается воздействие единичных элементов вооружения на забой.

На основании вышеуказанных аспектов наиболее эффективным решением является увеличение стойкости к динамическим циклическим нагрузкам зубьев стального вооружения шарошечных долот.

2.6 Обоснование решений по увеличению стойкости внутренних рядов стального вооружения шарошечных долот

Как показано в главе 1, при бурении мягких пород зубья шарошек должны внедряться в горную породу и откалывать от забоя частицы шлама

так, чтобы промывочная жидкость выносила разрушенную породу с забоя. То есть в кинематике работы долота должна преобладать скалывающая способность. Для достижения максимальной скорости бурения при внедрении зуба в породу он должен проворачиваться за счет проскальзывания шарошки. Соответственно, конструкция долота должна оказывать максимальное воздействие на забой, которое достигается при малом угле наклона цапфы в 33° в совокупности с максимально возможным смещением осей шарошек до 10 мм и большим вылетом и малым углом заострения зубьев.

На основании базовых методик проектирования шарошечных долот установлено, что для габарита 295,3-311,1 мм параметр смещения осей шарошек должен быть равен 10 мм, угол наклона цапфы 33° [88].

Однако, при прохождении интервалов, насыщенных валунно-галечными отложениями, данная конфигурация, обеспечивающая максимальную скорость проходки на основном протяжении бурения секции, приводит к катастрофическому преждевременному износу, который выражен сломом зубьев. Для решения проблемы увеличения стойкости вооружения и обеспечения высоких значений механической скорости проходки на всех интервалах предлагается разработка методических и технологических решений. Они включают в себя увеличение запаса прочности стальных зубьев, без влияния на конструктивные особенности шарошечного долота за счет коррекции геометрии стального вооружения, в совокупности с увеличением прочностных характеристик материала изготовления шарошек шарошечных долот. Также разработка регламента применения шарошечных долот при бурении валунно-галечных отложений.

Решение задачи по увеличению износостойкости стального вооружения шарошечных долот можно разделить на несколько групп:

- совершенствование армирующих материалов;
- совершенствование геометрии вооружения;

- совершенствование материалов изготовления шарошек долот.

На основании исследования, проведенного в п.2.1 и п.2.2 данной работы, установлено, что критически важное влияние на износостойкость стального вооружения при данном типе износа, который возникает при бурении валунно-галечных отложений, представленных в разрезе в виде пропластков в легкобуримой среде, имеют физико-механические свойства основного материала изготовления буровых шарошечных долот. Однако, комплексное решение, которое включает в себя не только совершенствование физико-механических свойств, но и усиление стальных зубьев приведет к увеличению износостойкости стального вооружения и позволит достигать необходимые технико-экономические показатели.

Предлагается для обеспечения высокой износостойкости и скорости проходки применять для условий бурения мягких пород с переслаиванием валунно-галечных отложений долота с конструктивными особенностями долот, предназначенные для мягких горных пород, с разработкой усиленной геометрии вооружения с применением материала шарошек из стали с повышенной стойкостью к динамическим нагрузкам.

2.6.1 Обоснование разработки пирамидальных зубьев для шарошек шарошечных долот со стальным вооружением

Общеизвестно, что при бурении мягких горных пород стальные зубья изготавливаются с большим вылетом. Шаг задается с обеспечением гарантированного беспрепятственного внедрения находящегося в контакте с горной породой зуба на максимально возможную большую глубину. Для бурения горных пород мягко-средних и средних по твердости с перемежающимися твердыми и абразивными (насыщенными песчаником) горными породами задается минимальный параметр смещения осей шарошек и меньшая агрессивность вооружения для исключения чрезмерного износа

зубьев. При этом должна обеспечиваться достаточная для получения достаточных скоростей проходки при бурении глинонасыщенных горных пород. Следовательно, для бурения средних пород должно быть обеспечено эффективное разрушения пропластков пород значительной твердости и абразивности, поэтому зубья делаются более короткими, нарезаются с меньшим шагом и большим углом заострения. Промежуточными, между указанными ранее типами «М» и «С», являются долота «МС», предназначенные для бурения мягких и средних пород (плотные глины с частыми прослоями мергелей, песчаники, соли, гипс и т. д.). Учитывая, что эти долота должны работать в пропластках пород повышенной твердости (песчаниках), для них принято смещение шарошек, аналогичное долотам типа «С». Для придания лучших скоростных показателей бурения мягких, пластичных пород, углы наклона цапф и углы конусов шарошек, а также условный угол калибровки скважины делаются близкими либо одинаковыми с долотами типа «М», а длину зубьев и их количество выбирают промежуточными между долотами типов «М» и «С» [78,79].

Геологический разрез Ванкорского месторождения в интервалах бурения от 30 м до 850 м преимущественно сложен мягкими и мягко-средними горными породами, для которых наиболее эффективно, для достижения высоких скоростей проходки, применять шарошечные долота с кодом IADC от 117 до 137, что относится к категориям твердости шарошечных долот от «М» до «С» [27]. Данный тип вооружения и конструкции долота обеспечивает высокую эффективность поражения забоя за счет преобладания скалывающего эффекта в совокупности с высокой агрессивностью вооружения. Преимущественно, применяется семи рядная конструкция, в общей сложности количество зубьев составляет от 65 до 87 в зависимости от профиля вооружения у различных производителей и соответствует коду IADC 117, так как именно этим типом долот достигается наиболее высокая скорость проходки.

Применение шарошечных долот «МС» с малыми значениями смещения и низкой агрессивностью вооружения приводит к снижению механической скорости проходки.

Для данных условий бурения актуально применять усиленное вооружение шарошечных долот при сохранении максимально возможного смещения и агрессивности вооружения, т.е. увеличение твердости горных пород компенсируется увеличением прочностных параметров. Усиление вооружения производится по следующим основным параметрам стальных зубьев шарошек долота:

- угол заострения зуба – угол между набегающей и сбегающей гранями зуба. Чем выше значение угла, тем большую прочность имеет зуб, но снижается внедрение в породу за счет большей площади контакта зуба с горной породой, значения варьируются от 41° до 50° ;

- притупление зуба – расстояние между набегающей и сбегающей гранями зуба. Чем выше значение притупления, тем большую прочность имеет зуб. Увеличивается значение притупления зуба с ростом твердости горных пород. Для мягких и мягко-средних значение составляет 2-3 мм;

- ширина зуба – расстояние между крайними точками в продольной плоскости зуба, зависит от расположения на схеме самоочищения и количества рядов зубьев долота. С увеличением твердости буримых горных пород величина снижается;

- высота зуба – расстояние от тела шарошки до максимальной верхней точки зуба в его вертикальной проекции. С увеличением твердости горных пород значение снижается. Также зависит от расположения зубьев на схеме самоочищения.

В Таблице 2.7 и Рисунке 2.14 приведено сравнение основных геометрических параметров зубьев долота, применяемых на данный момент и предлагаемых по результатам исследования в данной работе.

Таблица 2.7 – Варианты исполнения зубьев

Параметры зубьев	Тип зубьев		
	Стандартный	Усиленный	Пирамидальный
Высота Н, мм	29	29	29
Притупление Е, мм	3	4	3...14
Ширина В, мм	16,9	18,9	18,9
Угол заострения α , град	43	46	48
Площадь вершины зуба S, мм ²	41	46	46

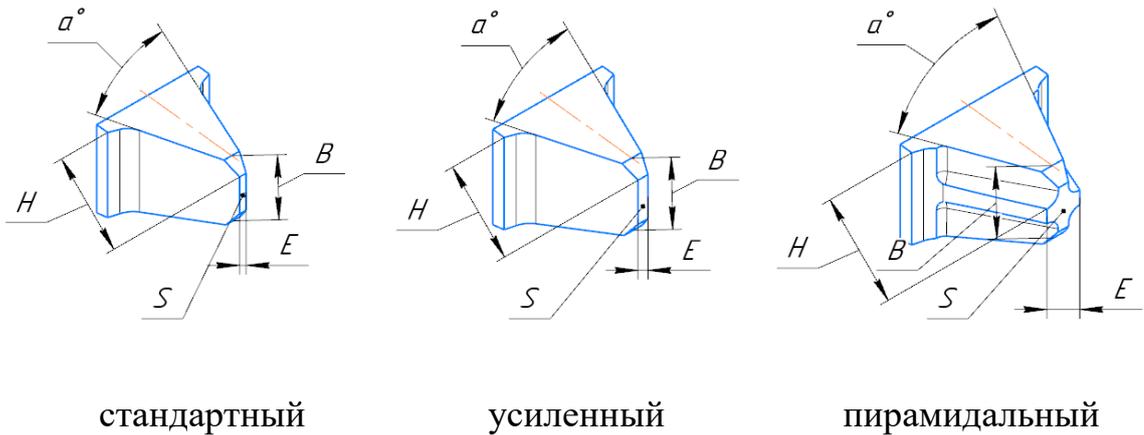


Рисунок 2.14 – Варианты исполнения зубьев

Приблизительно равная для всех типов зубьев площадь обеспечивает равную удельную нагрузку на горную породу, что исключает снижение механической скорости проходки при одинаковых значениях осевой нагрузки и количества зубьев на венцах шарошек долота.

Решением для бурения интервалов залегания валунно-галечных отложений, призванным снизить слом зубьев, стала пирамидальная конструкция стального зуба шарошки бурового долота. Геометрические характеристики предложенного решения в сравнении со стандартными решениями.

Для всех типов зубьев обеспечивается приблизительно равная удельная нагрузка на горную породу, за счет площади контакта от 41 до 46 мм², что исключает значительное снижение механической скорости проходки при одинаковых значениях осевой нагрузки и количества зубьев на венцах шарошек долота.

Усиление зубьев за счет увеличения угла заострения в совокупности с увеличением ширины зуба приводит к увеличению стойкости зуба при воздействии на него статических и динамических нагрузок.

Предложение совершенствования конструкции геометрии вооружения невозможно без сравнения взаимодействия каждого из типов зубьев с горной породой.

2.6.2 Обоснование разработки стали 19ХГНЗМА для шарошек шарошечных долот со стальным вооружением

Все нагрузки на стальное вооружение, описанные выше, носят динамический характер. Учитывая это, можно говорить о необходимости увеличения способности основного материала изготовления шарошек долот противостоять динамическим ударным нагрузкам – увеличению физико-механических свойств долотной стали.

Способность долотной стали противодействовать динамическим (ударным) нагрузкам зависит от величины ударной вязкости стали.

Ударная вязкость – способность материала, в данном случае долотной стали, поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки. Основным отличием ударных нагрузок от воздействия при растяжении, сжатии или изгибе является гораздо более высокая скорость выделения энергии на совершение воздействия на материал. Таким образом, ударная вязкость характеризует способность материала к быстрому поглощению энергии. Ее значение зависит от процентного соотношения легирующих элементов и последующей комплексной химико-термической обработки конечного изделия.

Основная задача материалов, которые применяются в шарошках и лапах буровых шарошечных долот – это обеспечение высокой работоспособности подшипниковых узлов с одновременным обладанием

высоких прочностных характеристик (предел текучести, временное сопротивление, ударная вязкость, относительное сужение, относительное удлинение), а также обладание высокими показателями к абразивному и контактно-усталостному износу.

Для производства буровых шарошечных долот применяются специальные марки сталей, такие как 15НЗМА, 19ХГНМА, 14ХНЗМА, и наиболее корректно проводить сравнение именно с данными моделями сталей. Данные стали обладают наиболее схожими физико-механическими свойствами, а главное обладают сопоставимыми эксплуатационными характеристиками [32, 58].

На Рисунке 2.15 схематично показана шарошка долота БИТ 295,3 Z1RSJ, в которой светло-серым цветом обозначена зона с «мягкой» сердцевиной значения твердости в которой должны быть в диапазоне 20-42 HRC, а темно-серой – цементированной упрочненной поверхности со значением твердости 56-62 HRC.

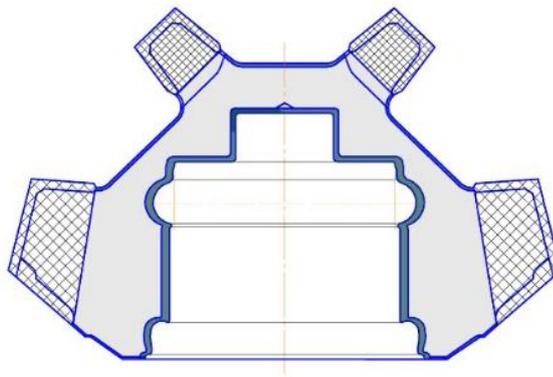


Рисунок 2.15 – Схема распределения твердости по сечению шарошки

Детали буровых шарошечных долот, кроме прочих, подвергаются значительным ударным нагрузкам, поэтому должны обладать достаточно вязкой структурой сердцевины. Поэтому для эффективного применения долотной стали требуется поддержание баланса физико-механических свойств и прокаливаемости. Прокаливаемость – это способность

закаливаться, т.е. увеличивать свою твердость на определенную глубину. Здесь важно понимать, что шарошечные долота являются инструментом дробяще-скалывающего действия и испытывают постоянные динамические нагрузки, при этом работают в крайне агрессивной среде. Должен быть баланс – «мягкая» сердцевина при твердой внешней поверхности, как со стороны подшипникового узла, так и с рабочей стороны. Полученные значения твердости после комплексной химико-термической обработки говорят о том, что предложенную сталь возможно использовать для шарошечных долот со стальным вооружением. Стали с высоким содержанием углерода и марганца (более 0,22 % С и более 1 % Mn), более склонны к растрескиванию в процессе эксплуатации деталей после применения упрочняющей химико-термической обработки с последующей закалкой и отпуском.

В качестве прототипа, как указано выше, принимается сталь 19ХГНМА, которая широко распространена и применяется при изготовлении буровых шарошечных долот. Основным недостатком данной марки стали является низкое содержание в ее составе легирующего элемента – никеля, который способствует стабилизации аустенита, в результате чего значительно снижается сопротивляемость микроударному разрушению. Другим недостатком является низкое значение величины относительного сужения, из-за чего возрастает вероятность хрупкого разрушения стали. На данный момент сталь марки 19ХГНМА применяется изготовления шарошек со стальным вооружением зубом в габаритах от 222,3 мм.

Также стоит упомянуть сталь марки 15НЗМА. Недостатками данной марки стали являются низкие значения временного сопротивления и предела текучести относительно предлагаемой марки стали, что приводит к увеличению вероятности пластической деформации и разрушению стали. Также, недостатком является относительно высокая себестоимость данной

марки стали за счет высокого значительно более высокой концентрации никеля в составе стали.

Применение стали 14ХНЗМА для изготовления шарошек шарошечных долот со стальным вооружением не эффективно, так как данная марка стали отличается высокими значениями прокаливаемости и при комплексной химико-термической обработке может получить сквозную закалку стального зуба, что приводит к увеличению твердости и, как следствие, снижению пластичности основного материала. В процессе работы это может привести к еще более скоротечному слому зубьев. Также, данная марка отличается высокой стоимостью, что негативно сказывается на массовом внедрении в производство шарошечных долот со стальным зубом.

Основными выходными параметрами для марок долотной стали являются физико-механические свойства, которые могут быть получены после химико-термической обработки, данные приведены в таблице 2.8. Физико-механические свойства предлагаемой марки стали превосходят физико-механические свойства аналогов по ударной вязкости за счет увеличенного содержания Ni в составе разработанной стали. Для получения указанных в Таблице 2.8 физико-механических свойств требуется использовать компонентный состав, который приведен в Таблице 2.9.

Таблица 2.8 – Физико-механические свойства марок сталей

Марка стали	$\sigma_{\text{в}}, \text{Н/мм}^2$ (кгс/мм ²)	$\sigma_{02}, \text{Н/мм}^2$ (кгс/мм ²)	$\delta, \%$	$\psi, \%$	КСУ, Дж/см ² кгс.м/см ²
	Не менее				
14ХНЗМА	980(100)	882(90)	12	50	107,8(11)
15НЗМА	784(80)	686(70)	12	55	107,8(11)
19ХГНМА	833(85)	735(75)	12	45	78,4(8)
19ХГНЗМА	835(86)	735(75)	12	50	98(10)

Таблица 2.9 – Химический состав

Легирующий Элемент, %	Марка стали			
	14ХНЗМА	15НЗМА	19ХГНМА	19ХГНЗМА
Углерод	0,11-0,16	0,11-0,17	0,18-0,22	0,16-0,21
Марганец	0,40-0,80	0,30-0,65	0,70-0,90	0,70-0,90
Кремний	0,20-0,35	0,15-0,30	0,20-0,35	0,20-0,350
Никель	3,0-3,50	3,20-3,80	0,45-0,65	2,70-2,90
Хром	1,05-1,55	0-0,30	0,45-0,65	0,40-0,60
Молибден	0,10-0,15	0,20-0,30	0,20-0,30	0,20-0,30

Ниже более детально описано влияние различных элементов на физико-механические свойства долотной стали 19ХГНЗМА.

Si (кремний) вводится в небольшом количестве 0,2-0,35 %, т.к. является очень хорошим раскислителем (раскислитель – это добавка, которая способствует удалению из расплавленных металлов, в том числе сталей, растворенного в них кислорода, который является вредной примесью) и кроме того повышает прочность материала при сохранении вязкости.

Mn (марганец) вводится в сталь в количестве около одного процента (0,7 %-0,9 %), так как он увеличивает твердость, износостойкость стали к ударным нагрузкам, не уменьшая при этом пластичности стали. Марганец, как и кремний является хорошим раскислителем стали. Также марганец устраняет вредное влияние серы (сера является вредной примесью).

Cr (хром) повышает твердость и прочность стали, но при этом незначительно снижается пластичность, в связи с этим его содержание должно быть около 0,5 % (0,4-0,6 %).

Mo (молибден) увеличивает предел прочности стали на растяжение, а также в присутствии никеля повышает прокаливаемость, но уменьшает вязкость, поэтому добавление его относительно небольшое – 0,2-0,3 %. Молибден вводится как технологическая добавка для улучшения механических свойств деталей буровых шарошечных долот после цементации.

Ni (никель) играет основную роль в предлагаемой марке стали. Значительно повышает прочность и увеличивает прокаливаемость, он также значительно повышает пластичность и вязкость стали. Содержание никеля в данной марке стали для обеспечения заданных физико-механических свойств должна быть около 2,8 % (2,7-2,9 %).

Для подтверждения выдвинутой гипотезы о необходимости использования компонентного состава стали, указанного в Таблице 2.9, был проведен ряд исследований физико-механических свойств, направленный на определение фактического компонентного состава и свойств полученных образцов стали 19ХГНЗМА.

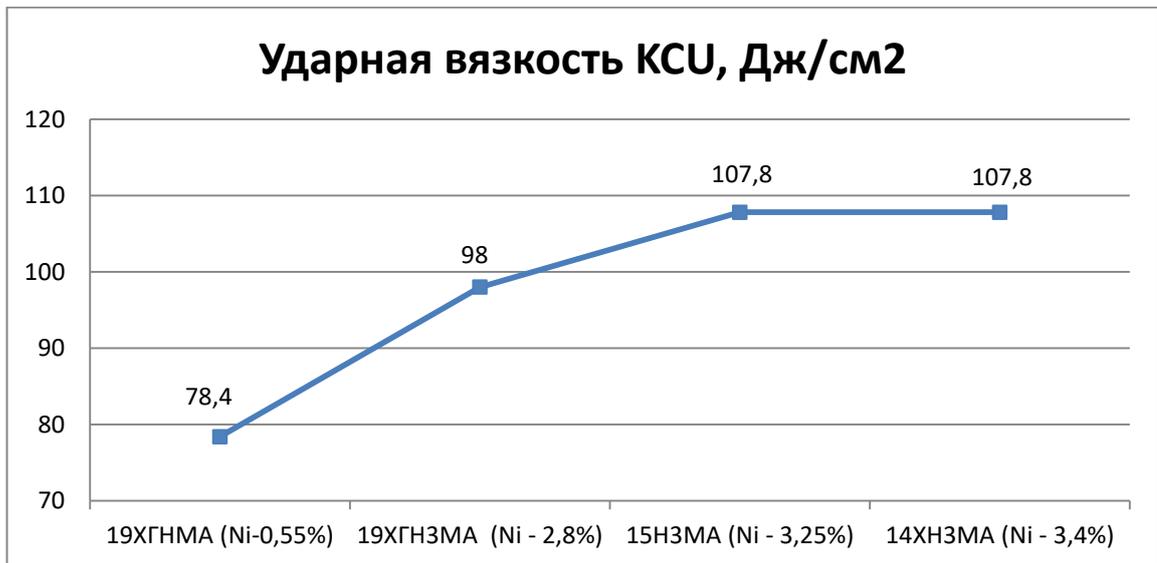


Рисунок 2.16 - Влияние никеля на ударную вязкость

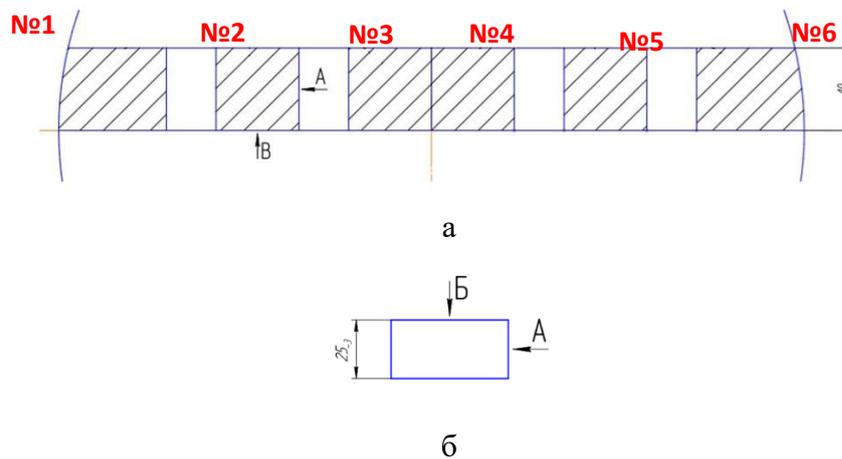
Исследование физико-механических свойств и фактического химического состава проводилось на базе сертифицированной лаборатории неразрушающего и разрушающего контроля, технической диагностики ООО НПП «БУРИНТЕХ» и включали в себя комплексную термическую обработку образцов по стандартному технологическому процессу. Последовательно проведенная закалка №1 и закалка №2 в масле с последующим отпуском низким и торцевой закалкой в воде. Определение фактического химического

состава проводилось Оптико-эмиссионным спектрометром FOUNDRY-MASTER. Данные приведены на Таблице 2.9. Прокаливаемость измерялась на двух диаметрально противоположных поверхностях (направление 1 и 2 соответственно). Результаты приведены в Таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Результаты определения прокаливаемости

Направление измерения	Твердость HRC на расстоянии, мм		
	6,5	20	30
1	43,0	35,5	32,5
2	42,5	34,5	31,5
Прогнозируемое значение	35...43	32...38	25...35

Производился анализ макроструктуры в поперечном сечении, микроструктуры в продольном и поперечном сечениях круга. Схема исследования круга приведена на Рисунке 2.17 (красными цифрами указаны номера темплетов для макроструктуры). Таким образом, макроструктура исследовалась в сечении Б на номерах №1...6. Микроструктура исследовалась в сечениях А, Б и В на темплете №2.



а – схема исследования макроструктуры;

б – схема исследования микроструктуры;

Рисунок 2.17 – Схема исследования круга

Микрошлифы для исследования структуры подготавливались в 3 этапа:

Этап 1: Шлифовка образцов на абразивной бумаге различной зернистостью с постепенным переходом от более грубого к более тонкому абразиву. При этом добивались устранения рисок от предыдущей более грубой наждачной бумаги. При переходе к каждому последующему номеру бумаги со шлифа тщательно удалялась оставшаяся наждачная пыль (образцы промывались в воде).

Этап 2: Полировка образцов на полировальных сукнах с использованием алмазных суспензий различной зернистостью до образования зеркальной поверхности образцов. Для удаления остатков алмазной суспензии образцы промывались в ацетоне. Микроструктурный контроль за процессом приготовления шлифов осуществлялся на оптическом микроскопе Olympus GX-51.

Этап 3: Химическое травление 3 % раствором азотной кислоты в спирте – для исследования микроструктуры, 50 % раствором соляной кислоты – для исследования макроструктуры.

Исследование микроструктуры шлифов осуществлялось на оптическом микроскопе Olympus GX-51 при увеличениях x50, x100, x200, x500 и x1000. Оценку загрязненности стали неметаллическими включениями проводили по ГОСТ 1778-70 методом Ш6 и величины зерна по ГОСТ 5639-82.

Макроструктура в сечении Б представлена на Рисунке 2.18. Результаты оценки макроструктуры представлены в Таблице 2.11.

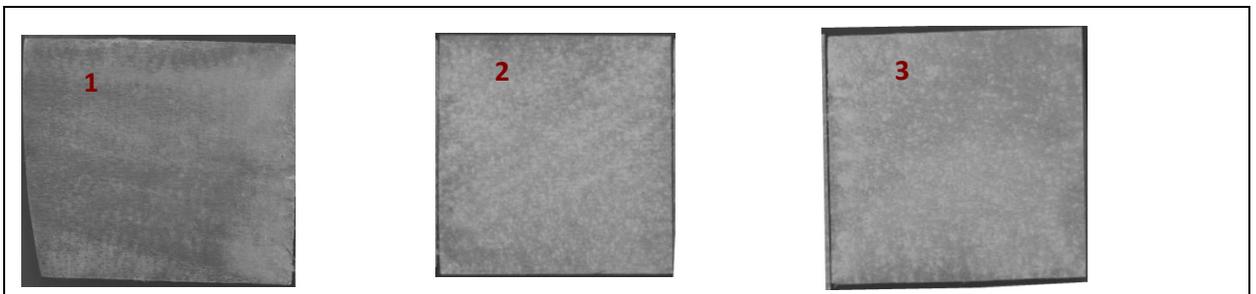
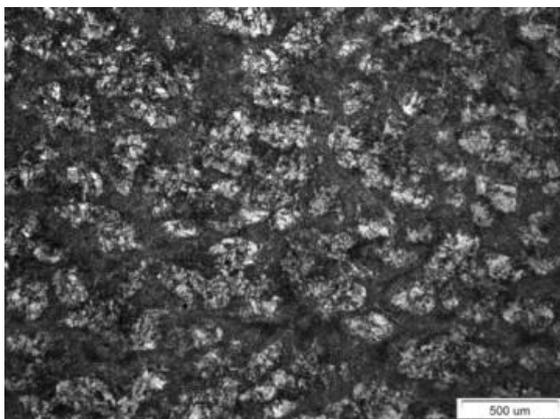


Рисунок 2.18 – Макроструктура сталь 19ХГНЗМА

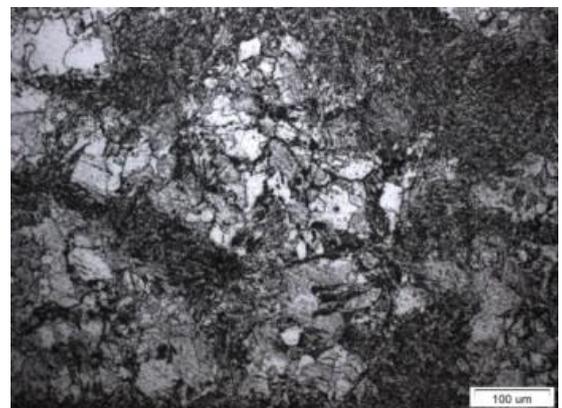
Таблица 2.11 – Результаты оценки макроструктуры

Объект контроля	Дефекты макроструктуры в баллах							
	центральная пористость	точечная неоднородность	Ликвационный квадрат	Общая пятнистая ликвация	Краевая пятнистая ликвация	Подсудочная ликвация	Подкорковые пузыри	Межкристаллитные трещины
Круг Ø270 мм	0	1,5	0	0	0	0	0	0
Требования ГОСТ 4543	не более 2	не более 2	не более 2	не допускается		не более 1	не допускается	

Микроструктура в сечении А,Б,В представлена на Рисунках 2.19-2.21.
Фазовый состав: зернистый перлит, феррит. Размер зерна соответствует 8 баллу по ГОСТ 5639.



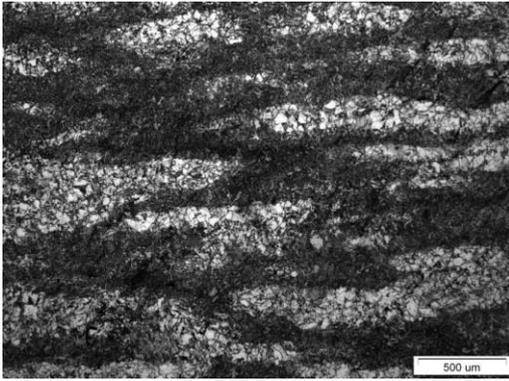
а



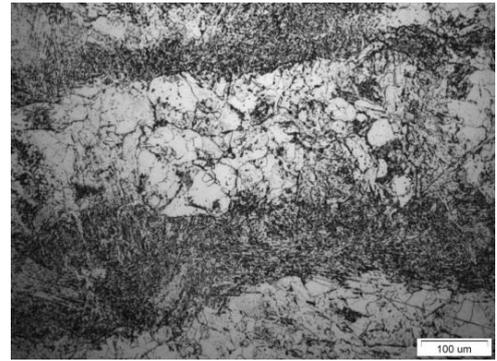
б

а – ув. х50; б – ув. х200;

Рисунок 2.19 – Микроструктура, сечение Б



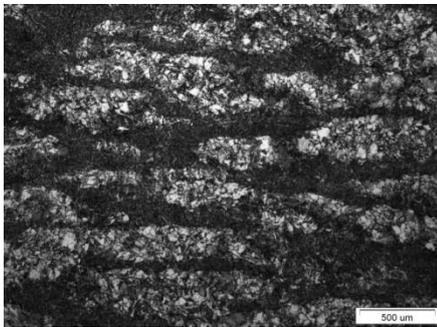
а



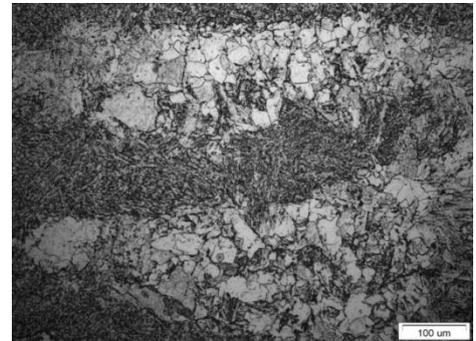
б

а – увеличение x50; б – увеличение x200;

Рисунок 2.20 - Микроструктура в продольном сечении А



а



б

а – увеличение x50; б – увеличение x200;

Рисунок 2.21 - Микроструктура в продольном сечении В

Микроструктурные и макроструктурные исследования заготовки стали 19ХГНЗМА показали, что сталь является высококачественной углеродистой стали и структурные компоненты соответствуют долотной стали, которую допускается применять для изготовления шарошечных долот со стальным вооружением.

Определение физико-механических свойств посредством проведения испытаний на растяжение и ударный изгиб. Испытания проводились на гидравлической машине для статических испытаний Instron 300DX серии SATEC, копер с вертикально падающим грузом Instron Ceast 9340 для динамических испытаний. Испытания регламентированы ГОСТ 1497-84,

ГОСТ 9454-78, ГОСТ 9013-59, ГОСТ 5657-69. Результаты сгруппированы в Таблицах 2.12 и 2.13.

Таблица 2.12 - Результаты испытаний на растяжение

Тип образца ГОСТ 1497-84	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Отн. удли., %	Отн. сужение, %
III	1006,1	1275,2	11,6	52,0
Прогноз	≥ 785	≥ 883	≥ 11	≥ 50

Таблица 2.13 - Результаты испытаний на ударный изгиб

Тип образца по ГОСТ 9454-78	Площадь сечения образца, см ²	Работа разрушения, Дж	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²
1	0,800	104,9	100,2
Прогноз	-	-	≥ 98

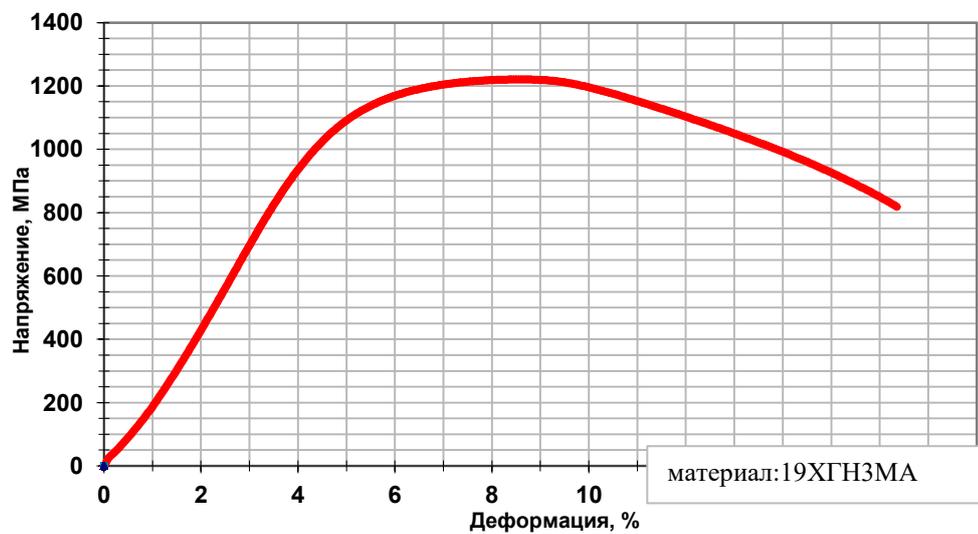
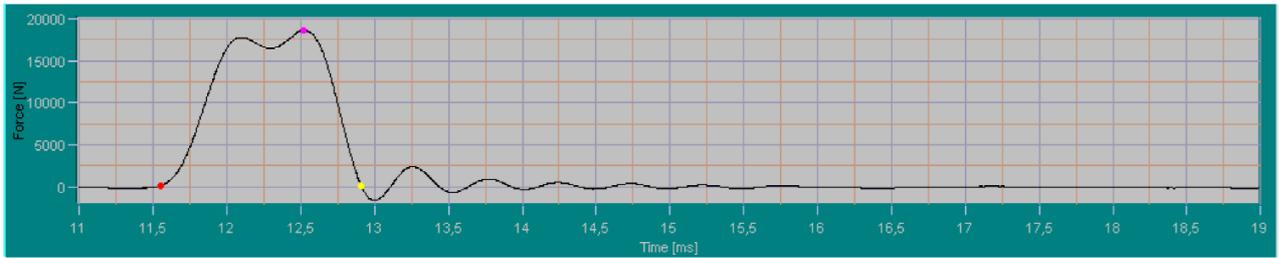
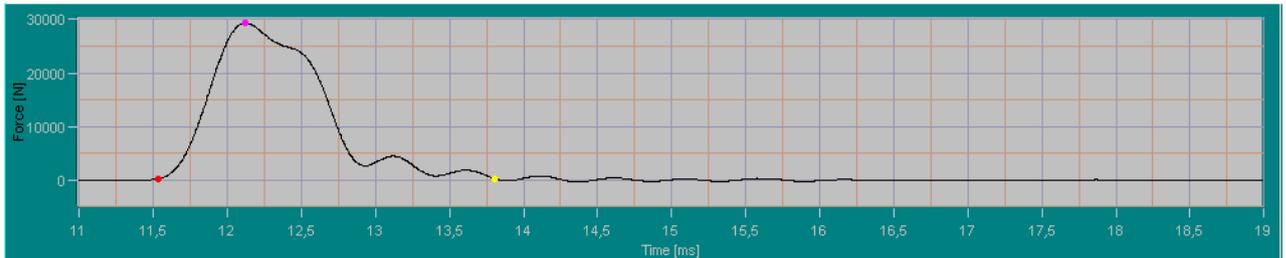


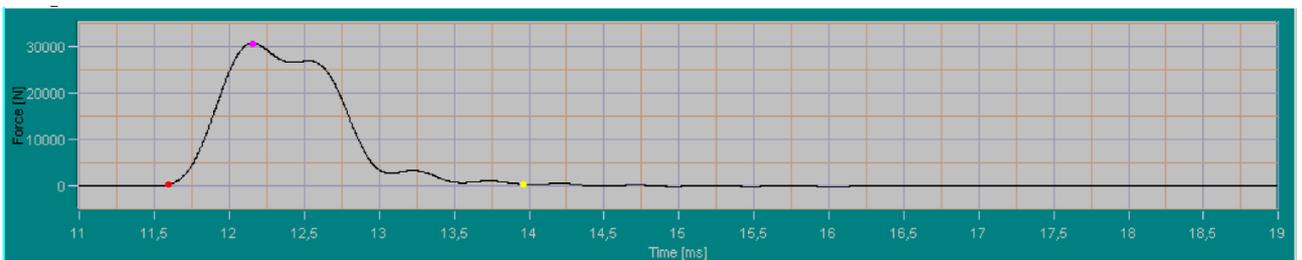
Рисунок 2.22- Зависимость напряжения течения от степени деформации



а)



б)



в)

Рисунок 2.23 – График нагружения при ударных испытаниях стандартного, усиленного и пирамидального зуба (а, б, в соответственно)

Результаты проведения исследований сгруппированы в отчет и представлены на Рисунке 2.24.

Основываясь на данных, можно утверждать, что применение заданного для стали 19ХГНЗМА процентного соотношения химических элементов приведет к увеличению износостойкости динамическим (ударным) нагрузкам без потери качества и технологичности изготовления шарошечных долот со стальным вооружением.

ООО НПП «БУРИНТЕХ»
Отдел шарошечных долот
Службы Главного Конструктора
Центра Разработки

Отчет №413-19 от 05.06.2018 г.

В результате проведения опытных работ №413 по исследованию экспериментальной марки стали 19ХГНЗМА для изготовления деталей буровых шарошечных долот с целью оценки целесообразности применения указанной марки стали были получены следующие результаты по основным параметрам:

1. Химический состав.

Контроль проводился методом оптического эмиссионного спектрального анализа. Результаты контроля химического состава по основным позициям (согласно ТС на сталь 19ХГНЗМА) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты контроля химического состава

Элемент	Расчетное содержание, %	Ср. фактическое содержание, %,*	Примечание
C	0,16-0,21	0,181	
Si	0,20-0,35	0,206	
Mn	0,70-0,90	0,834	
S	≤0,015	≤0,005	
P	≤0,025	≤0,005	
Cr	0,40-0,60	0,583	
Mo	0,20-0,30	0,309	допускается
Cu	≤0,25	0,153	
Ni	2,70-2,90	2,711	

* - ср. фактическое содержание – среднее значение, полученное по 3 обжигам.

2. Физико-механические свойства.

Контроль проводился в соответствии с ГОСТ 1497-84 (тип образца 3), ГОСТ 9454-78 (тип образца 1). Режим термической обработки соответствует ТС на сталь 19ХГНЗМА.

Результаты контроля физико-механических свойств (согласно ТС на сталь 19ХГНЗМА) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты контроля физико-механических свойств

Характеристика	Расчетное значение, не менее	Фактическое значение
Предел текучести, Н/мм ²	785	1006,1
Временное сопротивление, Н/мм ²	883	1275,2
Относительное удлинение, %	11	11,6
Относительное сужение, %	50	50,2
Ударная вязкость, Дж/см ²	98	100,2

3. На основе проведенных лабораторных исследований опытной плавки экспериментальной марки стали 19ХГНЗМА установлено соответствие расчетных параметров фактически полученным.

Подготовлено: инж.-констр. ОШД СГК ЦР

Согласовано: нач. отдела ШД СГК ЦР

 Валяев К.Р.
 Мыкалкин В.В.

Рисунок 2.24 – Фактические свойства стали 19ХГНЗМА

2.6.3 Расчет методом конечных элементов вариантов исполнения стального вооружения шарошечного долота

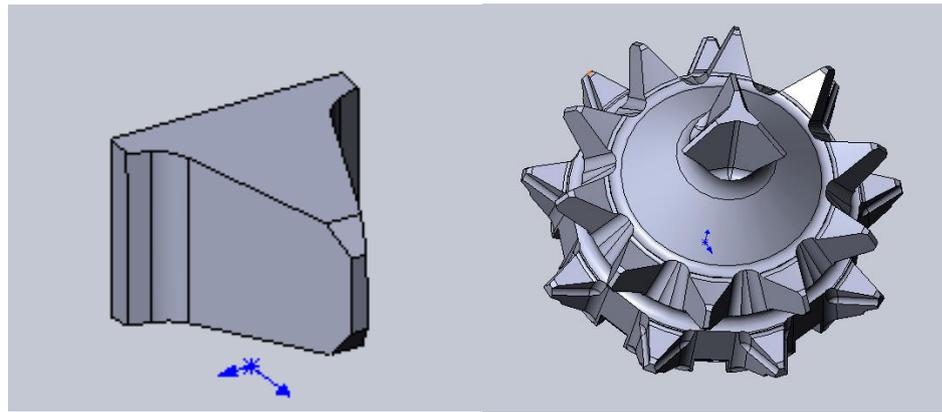
Для подтверждения правильности приведённых расчетов, обоснованных в главе 2 данной работы о применения стали 19ХГНЗМА в совокупности с усилением геометрии вооружения для увеличения стойкости к ударным нагрузкам стального вооружения, а именно единичного зуба необходимо провести проверочный расчет методом конечных элементов.

Расчет методом конечных элементов проведен на программном комплексе «Ansys Workbench» с построением виртуальные геометрических 3D моделей единичных элементов вооружения, а именно стальных зубьев, стандартной, усиленной и модернизированной конструкций [29, 75].

Расчет представляет собой сравнение прочностных показателей при статической нагрузке (постепенное приложение сил) и динамической нагрузке (кратковременное приложение сил) для единичного зуба при равных значениях приложенной силы. Расчет производится для двух типов материала – применяемой стали 19ХГНМА и разработанной 19ХГНЗМА. Так как существует необходимость найти оптимальные геометрические параметры зуба, обеспечивающие высокую эффективность при циклических динамических нагрузках, рассматриваются три типа исполнения геометрии зуба.

Стандартная геометрия зуба, которая взята за аналог - это единичный стальной зуб с шарошек шарошечного долота который серийно применялся на Ванкорском месторождении, далее по тексту «тип 1», Рисунок 2.25.

Усиленная геометрия зуба - это единичный стальной зуб с увеличенными углами заострения и шириной зуба, далее по тексту «Тип 2», Рисунок 2.26.

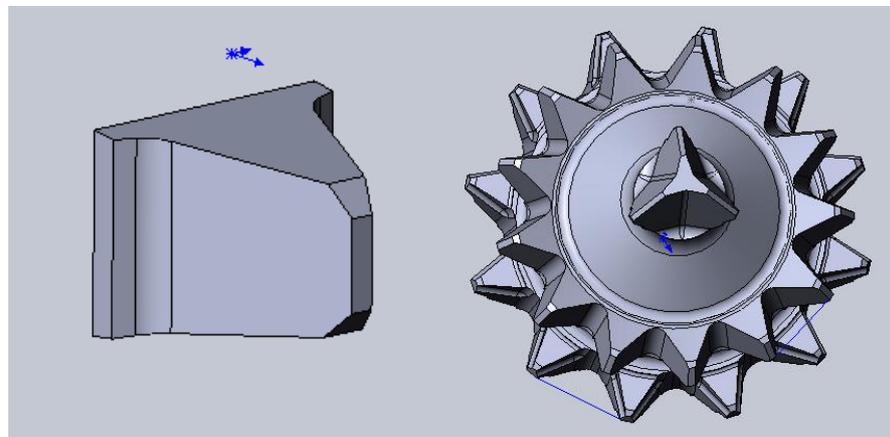


а)

б)

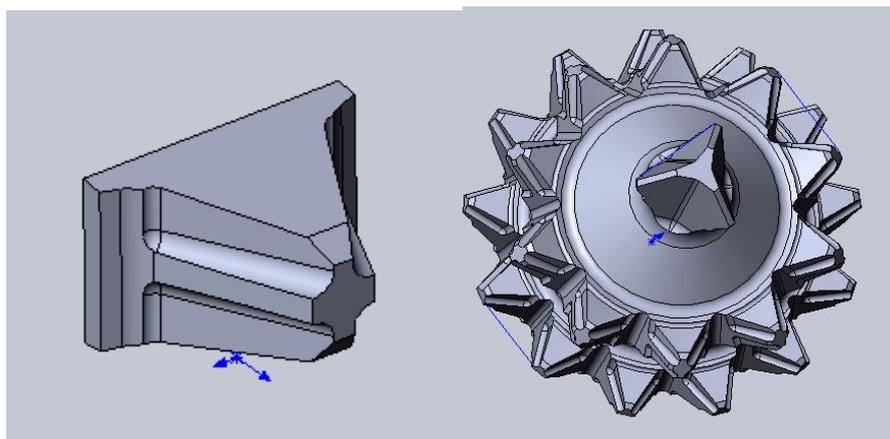
а – вид единичного зуба; б – общий вид шарошки №1

Рисунок 2.25 – тип 1



а – вид единичного зуба; б – общий вид шарошки №2

Рисунок 2.26 – тип 2



а – вид единичного зуба; б – общий вид шарошки №3

Рисунок 2.27 – тип 3

Пирамидальная геометрия зуба - это единичный стальной зуб с увеличенными углами заострения, переменной шириной зуба и притуплением. Зуб выполнен пирамидальной формы с углублениями для заполнения твердым армирующим покрытием. Далее по тексту «тип 3», Рисунок 2.27.

Методика проведения исследования методом конечных элементов следующая:

1. Испытания носят сравнительный характер и проводятся с целью определения запаса прочности при воздействии на зубья статической и динамической нагрузок. Для испытания заложено три типа зубьев, для каждой проводится испытание для двух прочностных групп – из стали 19ХГНМА и 19ХГНЗМА.

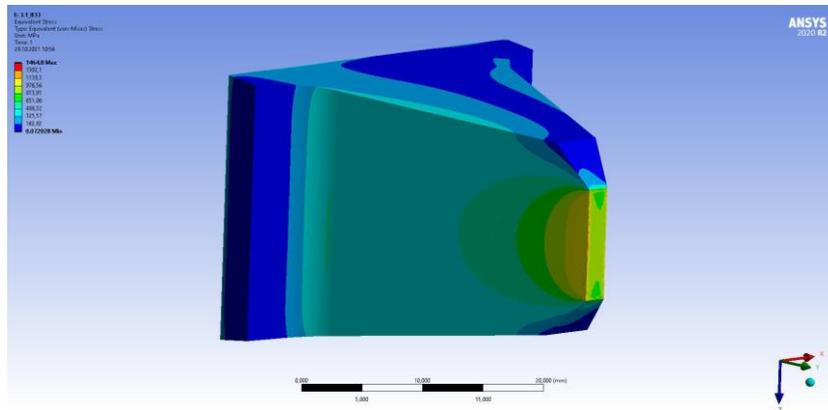
2. Для каждого типа зубьев подготовлена твердотельная модель. Задается одинаковая величина нагрузки, равная 35 кН, приложенная перпендикулярно к углу заострения зуба с набегающей стороны. Значение выбрано исходя из показателей прочности зуба, не превышающих предельно допустимую нагрузку, полученную при испытаниях разрушающими методами контроля.

3. Подготовленные в программе «SolidWorks» твердотельные модели загружены в программу «Ansys Workbench». Для моделей фиксируется поверхность для закрепления: поверхность основания зуба. Далее для моделей указывается направление и размер прилагаемой силы.

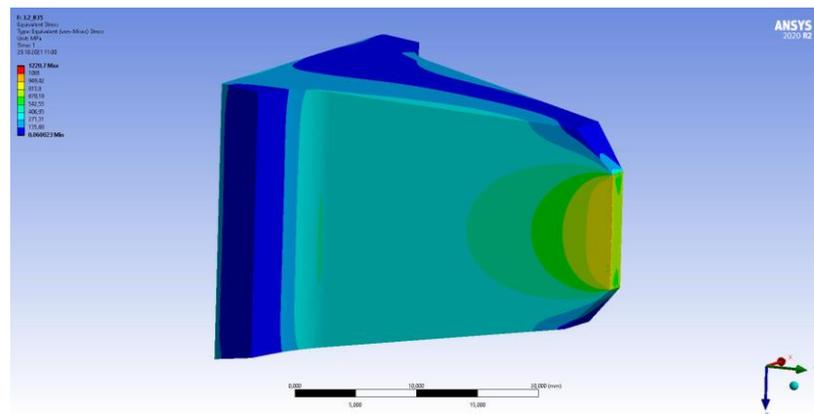
4. Далее производится расчет в программе.

Результат расчета моделей приведен на Рисунках 2.28-2.30. По цветовой шкале установлено, модули напряжений отличны друг от друга при приложении равной нагрузки. Причина отличия напряжений сжатия и изгиба между типами зубьев заключается в различной геометрии зубьев.

У моделей зубьев, выполненных из марки стали 19ХГНЗМА, напряжения сжатия и растяжения ниже, чем у зубьев из марки стали 19ХГНМА.

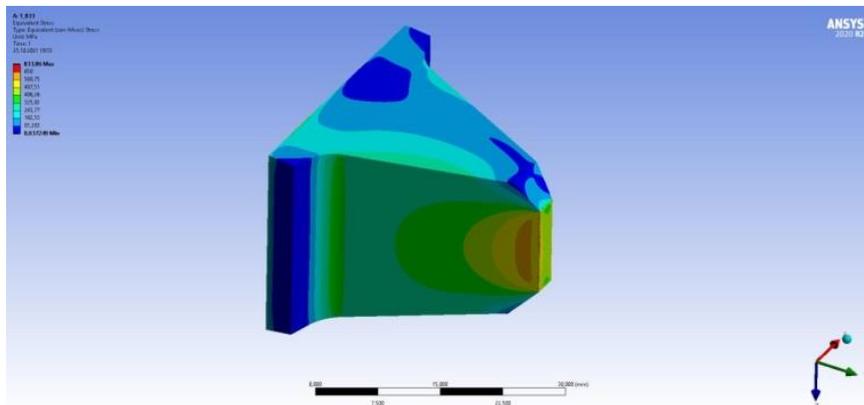


а)

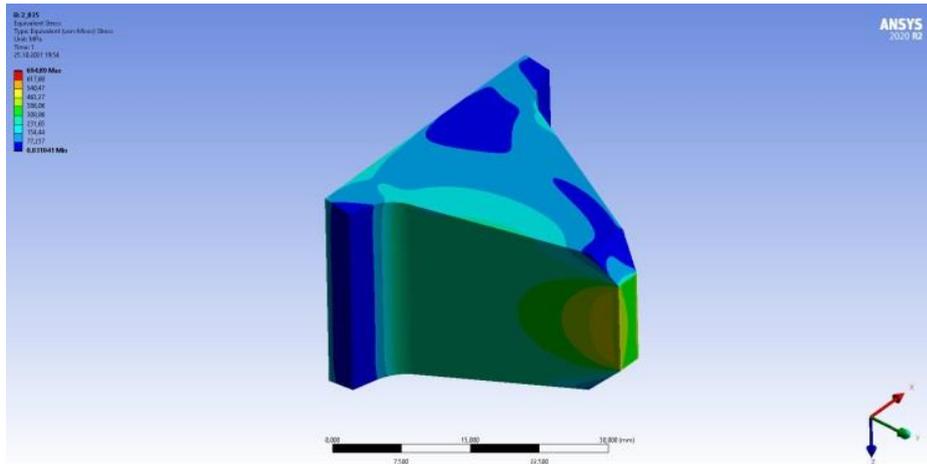


б)

Рисунок 2.28 - Результаты расчета нормальных напряжений в зубе типа 1 для стали 19ХГНМА (а) и 19ХГНЗМА (б)

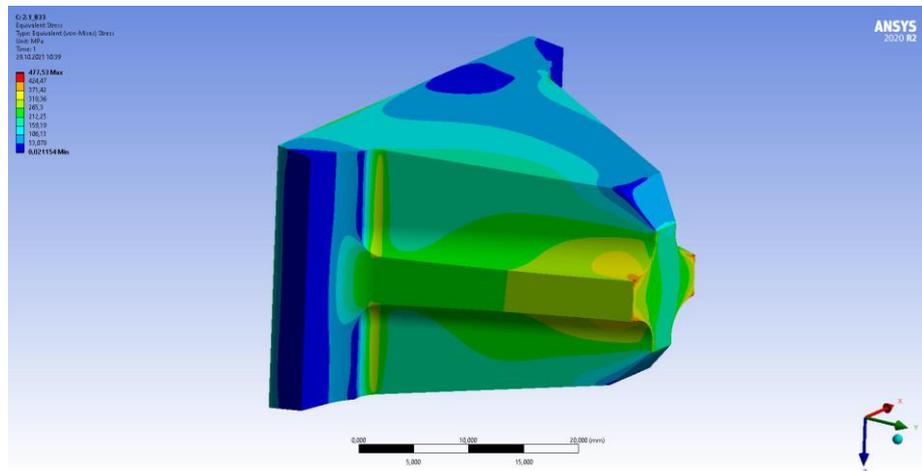


а)



б)

Рисунок 2.29- Результаты расчета нормальных напряжений в зубе типа 2 для стали 19ХГНМА (а) и 19ХГНЗМА (б)



а)

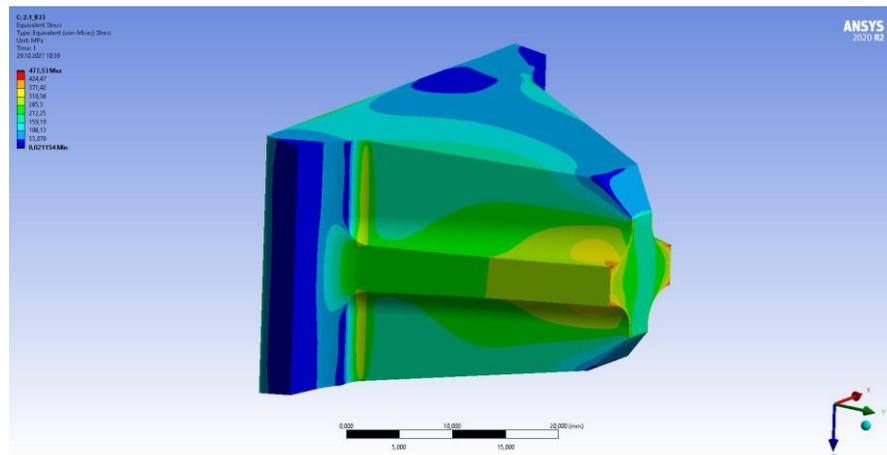


Рисунок 2.30 - Результаты расчета нормальных напряжений в зубе типа 3 для стали 19ХГНМА (а) и 19ХГНЗМА (б)

Результаты расчетов распределений суммарных напряжений при заданной нагрузке, рассчитанных в программе «Ansys Workbench» приведены в Таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Расчет распределенных суммарных нормальных напряжений

Вид напряжения	Стандартный	Усиленный	Пирамидальный
Максимальное напряжение сжатия, МПа	694,89	508,81	477,53
Максимальное напряжение изгиба, МПа	0,031	0,024	0,021

Из Таблицы 2.14 видно, что с увеличением угла заострения зуба α в совокупности с увеличением притупления зуба E при неизменной высоте зуба H и наличии ребер жесткости, образующих в сечении пирамидальную форму зубьев, изгибающие и сжимающие напряжения снижаются, что обеспечивает положительный эффект на способности зуба воспринимать динамические (ударные) нагрузки. За счет внедрения ребер жесткости выравнивается напряжение $\sigma_{сж}$. Это обеспечивает увеличение стойкости зубьев к ударным нагрузкам и обосновывается выбор геометрических параметров зубьев стального вооружения.

Также, по таблице установлена зависимость снижения суммарных нормальных напряжений при применении стали 19ХГНЗМА с увеличенными физико-механическими свойствами.

Исходя из полученных результатов, наилучшей геометрией стального зуба в плане максимальной износостойкости является третий тип исполнения стального зуба, выполненный из марки стали 19ХГНЗМА.

2.7 Выводы по главе 2

1. Анализ причин вывода из эксплуатации шарошечных долот с выделением групп, показал, о необходимости совершенствования в первую очередь стального вооружения шарошечных долот с привязкой к горно-геологическому строению Восточно-Сибирского региона.

2. Проведено изучение типов износа шарошечных долот со стальным вооружением с учетом влияния износа на механическую скорость проходки, обозначены граничные условия эффективного применения шарошечных долот на Ванкорском месторождении.

3. Рассчитан относительный запас вооружения по рядам, позволяющий установить, что отказ шарошечных долот со стальным вооружением при бурении мягких и мягко средних горных пород, осложнённых валунно-галечными отложениями, возникает из-за опережающего износа зубьев внутренних рядов, а именно зубьев, находящихся в нейтральном сечении. Снижение относительного запаса вооружения наблюдается до 34%.

4. Разработана геометрическая модель стального зуба шарошечных долот. Разработана долотная сталь со сбалансированными физико-механическими свойствами с увеличенной ударной вязкостью для повышения стойкости стального вооружения шарошечных долот.

5. Установлено, что при ударном приложении одинаковой нагрузки, сила, требуемая для разрушения образца пирамидальной формы из стали 19ХГНЗМА, на 33% выше, чем для стандартной конструкции зубьев. При этом пирамидальная геометрия зуба отвечает критериям для вооружения долот категории М и МС.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТОЙКОСТИ СТАЛЬНОГО ВООРУЖЕНИЯ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований по определению стойкости к циклическим ударным нагрузкам имитаторов стальных зубьев для получения сравнительных данных по ударной стойкости.

Анализ литературы показал, что наиболее эффективным средством моделирования процесса бурения будет проведение натуральных испытаний с шарошечными долотами. Однако данный метод исследований не является показательным для исследования вооружения шарошечных долот, в том числе стального вооружения по нескольким причинам:

- по причине сложности бурения горно-геологического разреза и его неоднородности, так как нарушается повторяемость экспериментов, что приводит к снижению их информативности;
- невозможность имитировать в лабораторных условиях ресурсные испытания, для которых требуется разбуривание значительных интервалов;
- сложность обеспечения форсированных режимов бурения в течение продолжительного временного интервала.

Вышеуказанные причины не позволяют проводить ресурсные испытания при разбуривании образцов горных пород шарошечным долотом или его аналогом, поэтому принято решение применять сравнительные испытания единичных элементов вооружения.

3.1 Экспериментальный стенд и методика проведения испытаний

Испытание заключается в проведении опытов по приложению циклической ударной нагрузки на образцы, имитирующие стальной зуб, которые в свою очередь выполнены из различных типов материалов и отличаются различной геометрией. Опыты проводятся при одинаковых параметрах частоты вращения, и различных параметрах площади контакта, силы и продолжительности взаимодействия.

После проведения сравнивается удельная энергия разрушения при потере равной массы образца, оценивается макроструктура на наличие скрытых дефектов, возникающих в результате усталостного износа.

На основании полученных данных проанализирована стойкость зубьев в различном исполнении. Стенд представляет собой модернизированный фрезерный станок, общий вид которого представлен на Рисунке 3.1



Рисунок 3.1 – Общий вид испытательного стенда

На вращающийся вал крепятся сменные имитаторы зубьев, совершающих вращательное движение, которое наносит последовательные циклические удары по сменной ответной детали. Сменная ответная деталь представляет собой стальную планку и крепится статично с одной стороны и подпружинена со второй. Таким образом, происходит гашение удара и демпфирование удара.

Схема оснастки для проведения испытаний показана на Рисунке 3.2.

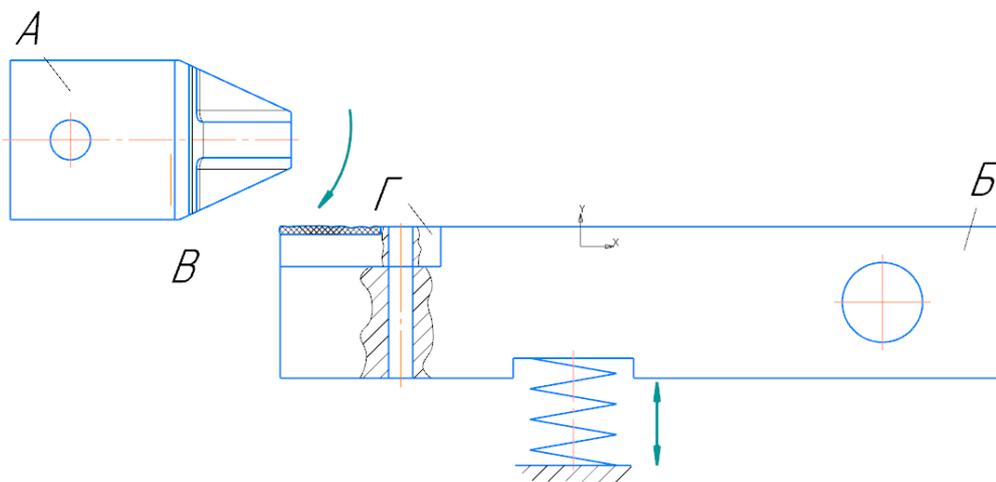


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема стенда для проведения испытаний

Методика испытаний заключается в проведении ряда опытов по приложению циклической ударной нагрузки к образцам стальных зубьев различного материала и конфигурации для сравнительной оценки влияния ударного износа на зубья.

Испытания проводятся в следующей последовательности:

1. В оснастку шпиндельной части А устанавливаются испытываемые образцы В из перечня возможных конфигураций зубьев. В качестве ответной детали устанавливается стальная термообработанная планка Г, жестко зафиксированная на подпружиненной балке Б.

2. Обеспечивается вращение шпиндельной секции с постоянной частотой вращения станка 300 об/мин.

3. Ответная деталь устанавливается так, чтобы ширина зоны перекрытия обеспечивала постоянную площадь контакта соударяемых деталей. Энергия одного удара рассчитывается как произведение момента инерции тела и угловой скорости тела и составляет для заданных параметров постоянную величину.

4. Проводится серия ударов, определенная из постоянного количества ударов, для обеспечения повторяемости проведения эксперимента.

5. При одинаковом количестве ударов наблюдается различная степень разрушения имитаторов стальных зубьев. Износ определялся по результатам исследований макроструктуры на наличие дефектов и потере массы образца.

3.2 Планирование испытаний по определению стойкости стального вооружения шарошечных долот при циклических ударных нагрузках

Метод основывается на проведении стендовых испытаний на оценке состояния элементов вооружения различной геометрии и физико-механических свойств при фиксированных режимах работы. Выполнение аналитических расчетов и проверка их достоверности в лабораторных условиях всегда присутствует при создании новой техники. Поэтому особое внимание следует уделить планированию эксперимента ввиду дороговизны проведения стендовых испытаний в условиях, приближенных к реальным условиям [38].

Планирование эксперимента применяется, зачастую, для определения количества и условий постановки опытов, необходимых для построения модели, описывающей процесс с достаточной точностью. В работах Козловского Е.А. и Адлера Ю.П. изложены требования, предъявляемые к

измеряемым факторам: измеримость с заданной точностью (достоверность), управляемость, совместимость и независимость [1].

Планирование эксперимента будем проводить путем постановки полнофакторного эксперимента (ПФЭ) с целью поиска наилучших условий функционирования изучаемого процесса [73].

Зависимость числа опытов от числа уровней факторов имеет вид:

$$N=2^k, \quad (3.1)$$

где k – число факторов.

$$N=2^3=8 \quad (3.2)$$

Все возможные комбинации значений для 3-х факторов, варьируемые на двух уровнях, будут укладываться в восемь опытов. В каждом из опытов проведем по одному исследованию. Рассмотрим зависимость потери массы материала от таких факторов как площадь контакта S , геометрия зуба (притупление) E и ударная вязкость материала ρ :

$$V = f(x_1, x_2, x_3), \quad (3.3)$$

где x_1 – площадь контакта, мм^2 ;

x_2 – притупление, мм ;

x_3 – ударная вязкость материала, Дж/см^2 .

Опытные работы проводили варьированием переменных x_1 , x_2 и x_3 . Каждую из переменных варьировали на двух уровнях (верхнем и нижнем), условно обозначенных символами +1 и -1.

Интервал варьирования – некоторое число, прибавление которого к основному уровню дает верхний, а вычитание – нижний уровни фактора.

Основной уровень - исходная точка для построения плана эксперимента.

Построение плана эксперимента – выбор экспериментальных точек, симметричных относительно нулевого уровня, показано в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Интервалы варьирования независимых переменных

Значения	x_1	x_2	x_3
Основной уровень	120	5	98
Интервал варьирования	60	3	20
Верхний уровень ($x_i = +1$)	180	8	118
Нижний уровень ($x_i = -1$)	60	2	78

Матрица планирования ПФЭ приведена в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Матрица планирования								Рабочая матрица			Результаты параллельных опытов Y_{iu} , г	Среднее \bar{Y}_u , г
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	Площадь контакта, мм ²	Пригупление, мм	Ударная вязкость, Дж/см ²		
1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	180	8	78	1,78 1,74 1,69 1,91	1,78
2	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	60	8	78	1,55 1,47 1,61 1,54	1,54
3	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	180	2	78	2,01 2,11 1,99 2,03	2,04
4	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	60	2	78	1,98 1,94 1,89	1,93

												1,92	
5	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	180	8	108	1,54 1,51 1,60 1,58	1,55
6	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	60	8	108	0,34 0,48 0,41 0,44	0,42
7	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	180	2	108	1,5 1,44 1,39 1,40	1,43
8	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	60	2	108	1,12 1,21 1,18 1,19	1,18

После проведения опытов выполняем статистическую обработку результатов. Определяем ошибки повторных опытов. Среднеквадратичное отклонение определяем по формуле:

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (Y_i - \bar{Y})^2, \quad (3.4)$$

где \bar{Y} – среднее арифметическое значение параметра оптимизации из $n=4$ повторных опытов (значения приведены в Таблице 2.2).

Расчеты сводим в Таблицу 2.3.

Таблица 3.3 – Значения среднеквадратичных отклонений

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
S_i^2	0,0089	0,0033	0,0028	0,0014	0,0016	0,0035	0,0020	0,0015
S_i	0,0942	0,0574	0,0526	0,0377	0,0403	0,0591	0,0446	0,0387

Для определения брака используем критерий Стьюдента:

$$\frac{y-\bar{y}}{s} \geq t \quad \text{или} \quad t_{\text{расч}} \geq t_{\text{табл}}, \quad (3.5)$$

где t – критерий Стьюдента, его значение для 4 повторных опытов и доверительной вероятностью 0,95 равно 3,18.

Например, для первого опыта $Y_{\min}=1,69$; $Y_{\max}=1,91$; $\bar{Y} = 1,78$.

$$\frac{1,78-1,69}{0,0942} = 0,95; \quad \frac{1,91-1,78}{0,0942} = 1,38 \quad (3.6)$$

Условие $t_{\text{расч}} \geq t_{\text{табл}}$ не выполняется, следовательно, результаты повторных опытов можем считать верными. Аналогично, остальные выборки считаем верными.

Вычисляем дисперсию выходного параметра:

$$s^2(Y) = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (Y_i - \bar{Y})^2}{N \cdot (n - 1)} = \frac{\sum_1^N S_i^2}{N} =$$

$$= \frac{0,0089 + 0,0033 + 0,0028 + 0,0014 + 0,0016 + 0,0035 + 0,0020 + 0,0015}{8} = 0,0031,$$

Проверку однородности дисперсий выполняем по критерию Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2} = \frac{S_1^2}{S_4^2} = \frac{0,0089}{0,0014} = 6,22 \quad (3.7)$$

Число степеней свободы:

$$f_4 = f_7 = n - 1 = 4 - 1 = 3 \quad (3.8)$$

$$F_{\text{табл}} = 9,28.$$

$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, значит дисперсии однородны.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (3.9)$$

Определим коэффициенты регрессии. Для экспериментального плана, обладающего оптимальными свойствами, коэффициенты модели находятся по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^n Y_u, \quad (3.10)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot Y_u, \quad (3.11)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot Y_u, \quad (3.12)$$

$$b_{ijk} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot x_{ku} \cdot Y_u. \quad (3.13)$$

где i – номер рассматриваемого факторов;

j – номер рассматриваемого факторов,

k – номер рассматриваемого факторов,

u – номер параллельного опыта,

n - число параллельных опытов.

Находим коэффициенты регрессии:

$$b_0 = \frac{1,78 + 1,54 + 2,03 + 1,93 + 1,56 + 0,42 + 1,43 + 1,18}{8} = 1,484,$$

$$b_1 = \frac{1,78 - 1,54 + 2,03 - 1,93 + 1,56 - 0,42 + 1,43 - 1,18}{8} = 0,217,$$

$$b_2 = -0,160, \quad b_{13} = 0,132,$$

$$b_3 = -0,338, \quad b_{23} = 0,002,$$

$$b_{12} = 0,127, \quad b_{123} = 0,093.$$

С учетом значения дисперсии воспроизводимости $S^2(Y) = 0,0031$ и с доверительной вероятностью 0,95 находим границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии.

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot S(Y)}{\sqrt{N}} = \pm \frac{3,18 \cdot 0,055}{\sqrt{8}} = \pm 0,063 \quad (3.14)$$

Сравнивая значения коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов, видно, что коэффициент b_{23} , незначим и их решено исключить.

Уравнение регрессии принимает вид:

$$\hat{y} = 1,484 + 0,217 \cdot x_1 - 0,160 \cdot x_2 - 0,338 \cdot x_3 + 0,127 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,132 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,093 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (3.15)$$

Проверяем адекватность полученного уравнения.

Вычисляем теоретические значения параметра оптимизации \hat{y} , величину ошибки $\Delta y = \bar{y} - \hat{y}$, результаты сводим в Таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Значения параметров

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
\hat{y}	12,55	4,16	4,54	1,50	17,29	5,74	6,25	2,06
$\bar{y} - \hat{y}$	-5,25	-1,28	-1,22	0,21	-7,67	-2,60	-2,35	-0,43
$(\bar{y} - \hat{y})^2$	27,58	1,64	1,49	0,05	58,87	6,74	5,53	0,19

Рассчитаем дисперсию адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{f} \cdot \sum_{u=1}^N (\bar{Y}_u - \hat{Y}_u)^2 = \frac{1}{f} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta y_i^2, \quad (3.16)$$

где $f = N - (k + 1)$ – число степеней свободы.

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{0,113}{8-(3+1)} = 0,282 \quad (3.17)$$

Адекватность математической модели определяем по критерию Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2(Y)} = \frac{0,282}{0,0031} = 9,11, \quad (3.18)$$

$$F_{\text{табл}} = 9,28.$$

$F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$, следовательно, модель адекватна.

Поясним физический смысл полученной зависимости. Полученное соотношение показывает взаимосвязь потери массы имитатора стального зуба с такими факторами, как площадь контакта, мм², притупление, мм, ударная вязкость материала, Дж/см².

В данном случае на параметр оптимизации перечисленные факторы влияют пропорционально, и на это указывают линейные эффекты. С увеличением значений факторов уменьшается потери при износе вооружения. Наибольшее влияние оказывают такие факторы как перекрытие образца и притупление. Объяснение данного явления, по всей видимости, стоит искать в большом интервале варьирования данных параметров. Но следует заметить, что большой интервал варьирования был выбран сознательно для наглядности проведения эксперимента. Минимальная потеря массы основного металла достигается при использовании материала с ударной вязкостью 108 Дж/см², перекрытии 60 мм², и максимальном притуплении.

3.3 Результаты и обработка полученных данных

Результаты, которые приведены в таблице 3.5, отражают сравнительные показатели по 6 образцам, отработанным на стенде.

Таблица 3.5 – Результаты испытаний образцов

Вид напряжения	Стандартная		Усиленная		Пирамидальная	
	19ХГНМА	19ХГНЗМА	19ХГНМА	19ХГНЗМА	19ХГНМА	19ХГНЗМА
Частота вращения, об/мин					300	
Площадь контакта, мм ²					120	
Количество ударов, ед.					300000	
Суммарная энергия, затраченная на опыт, Дж					3618000	
Начальная масса, г	217,1	220,4	215,4	213,65	215	217,5
Конечная масса, г	200,6	207,9	207,6	207,15	206,5	212
Потеря массы, г	16,5	12,5	8,0	6,5	8,5	5,5
Потеря массы, %	7,6	5,6	3,7	3,00	3,9	2,6

Результаты, приведенные в Таблице 3.5, наглядно показывают снижение потери массы при применении стали 19ХГНЗМА с увеличенным параметром ударной вязкости.

Макроструктурные исследования отработанных образцов, необходимые для определения дефектов и загрязнений согласно ГОСТ 1778-70 (по наиболее загрязненному месту). На Рисунке 3.3 – 3.5 приведена макроструктура образцов в поперечном сечении для каждого типа с различными типами материала.

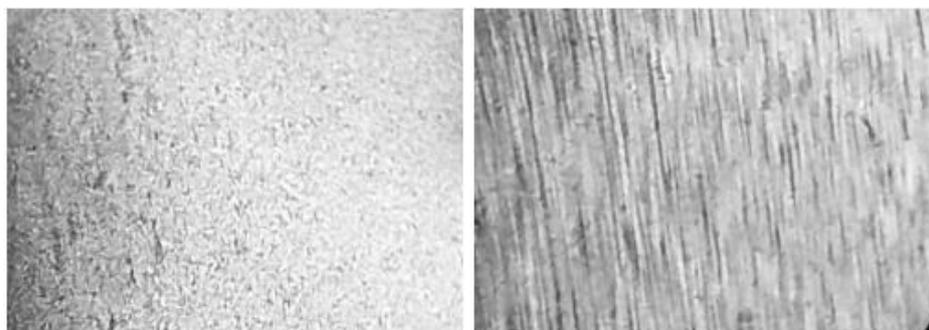


Рисунок 3.3 – Микроструктура образцов, тип 1

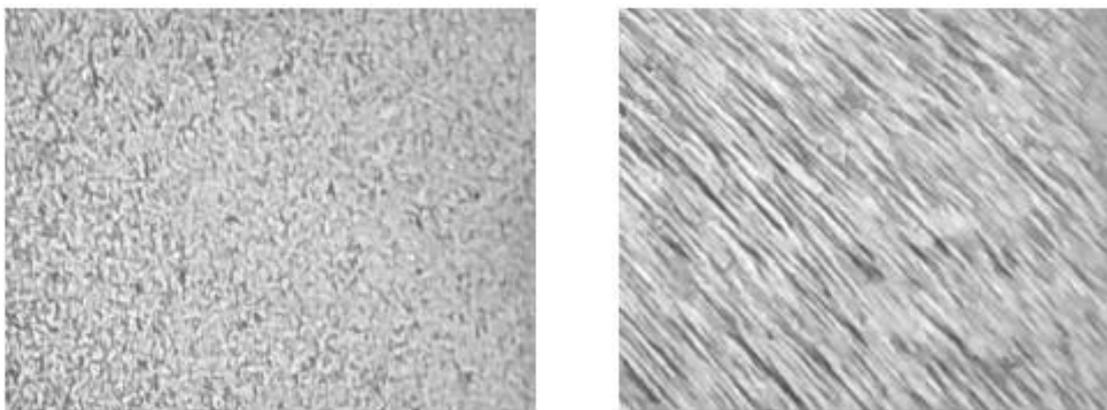


Рисунок 3.4 – Микроструктура образцов, тип 2

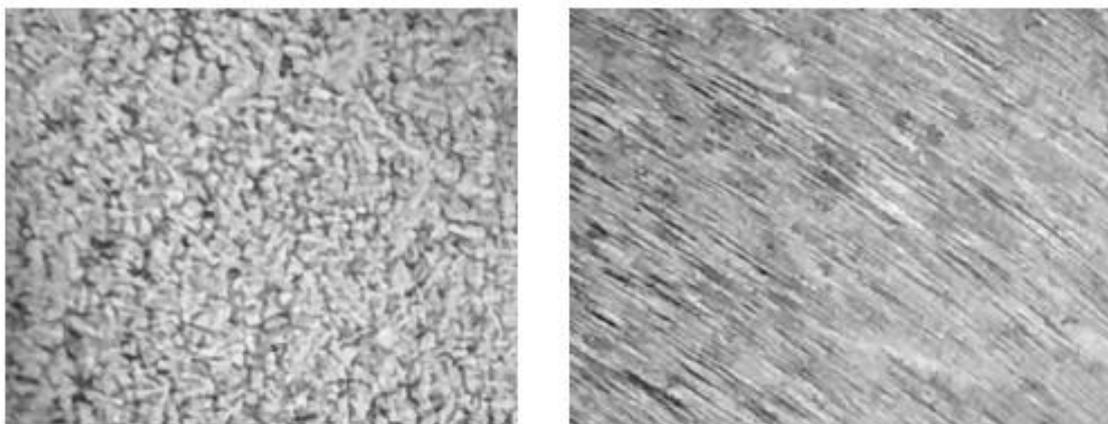


Рисунок 3.5 – Микроструктура образцов, тип 3

В макроструктуре образца дефектов не обнаружено. В данном разделе приведен пример рассмотрения одной серии опытов, на основании методики описана и детально отражена последовательность эксперимента на одном режиме работы. Корректность проведенных исследований проверяется в п.3.2 данной работы.

3.4 Выводы по главе 3

1. Для соблюдения достоверности проведения исследований по определению стойкости стального вооружения шарошечных долот и проведения требуемого количества экспериментов выполнено планирование эксперимента. Определены значимые параметры и характеристики, влияющие на циклическую ударную стойкость.

2. Разработан стенд для испытания образцов, которые имитируют стальное вооружение шарошечных долот. Подобраны наиболее износостойкие, с точки зрения ударной стойкости, геометрические параметры зубьев стального вооружения и на практике установлена линейная зависимость стойкости зубьев при циклических ударных нагрузках от таких параметров как ударная вязкость основного материала, величина притупления зуба, и степень контакта зубьев.

3. Полученная зависимость показывает, что наименьший износ получают зубья, выполненные из стали с повышенным показателем ударной вязкости с максимально возможным притуплением, без изменения площади контакта зуба с горной породой.

4 РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БУРЕНИЯ ШАРОШЕЧНЫМИ ДОЛОТАМИ СО СТАЛЬНЫМ ВООРУЖЕНИЕМ

4.1 Разработка шарошечного долота с пирамидальным стальным вооружением внутренних рядов

В вышеизложенных главах данной диссертационной работы приведена актуальность и обоснование усиления геометрических параметров зубьев стального вооружения шарошечных долот. Отмечено, что для достижения высоких скоростей проходки требуется минимизировать износ стального вооружения при прохождении пропластков, содержащих валунно-галечные отложения. Данный технический результат достигается благодаря ряду конструктивных и технологических решений. Основным решением является создание шарошечного долота с учетом рекомендаций, опубликованных в данной научно-квалификационной работе.

Дальнейшее проектирование осуществляется по стандартам проектирования шарошечных долот на разработанном в ООО НПП «БУРИНТЕХ» модуле Conebit.exe, который служит для проектирования базовых параметров шарошечных долот [91, 93].

Согласно геологическим данным в требуемом регионе проведения буровых работ интервал составил от 0 до 1000 м максимум, причем конечный забой варьируется в пределах 100 м по согласованию с геологической службой предприятия недропользователя. Интервал сложен песчаниками, глинами, известняками и включениями доломитов, что соответствует мягким и средним горным породам.

В интервалах от 0 до 500 м допускается наличие валунно-галечных отложений с диаметром отдельной фракции до 30 мм.

С учетом того, что основной интервал сложен породами, которые соответствуют мягким, мягко-средним и средним породам, выбираем шарошечное долото со стальным вооружением с профилем, исходя из необходимости разрушения данных пород. Схема самоочистки представлена на Рисунке 4.1. Исходные данные приведены ниже:

- диаметр породоразрушающего инструмента – 295,3 мм;
- интервал бурения – 0–1000 м;
- угол наклона цапфы – 33 градусов;
- параллельное смещение осей – 10 мм;
- общее количество рядов – 7 шт;
- тип опоры – герметизированная опора скольжения;
- частота вращения – до 280 об/мин;
- ожидаемая скорость бурения – не менее 40 м/ч;
- код IADC: 117.

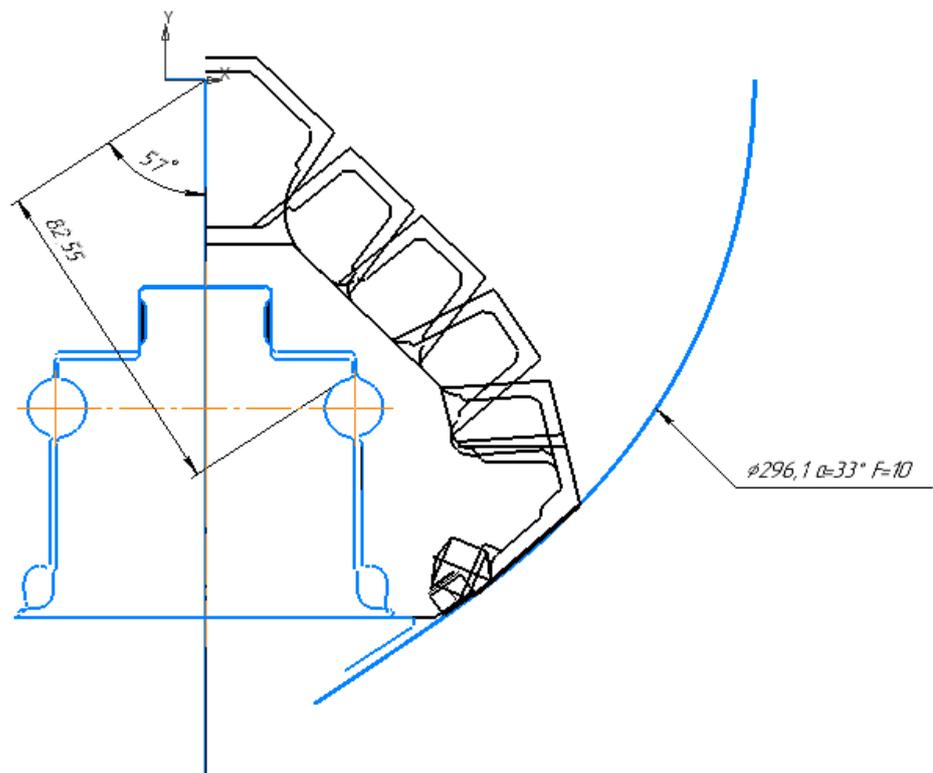


Рисунок 4.1 – Схема самоочистки предлагаемого долота

Сводим все данные в программу расчета основных параметров шарошечных долот, фотографии с исходными данными приведены на Рисунке 4.2-4.3.

Исходные данные:			Номинал	Допуск
1.	Угол наклона цапфы, град	φ	33	15 0
2.	Смещение	e	10	0,25 0
3.	Расстояние до торца	W	136	
4.	Диаметр долота	D	295,3	0,8
Расчет справочного размера:				
1.	Угол наклона цапфы (обратный), град	$90-\varphi$	57	15 0
2.	Технологический размер	N	156	0,13 -0,13
3.	Припуск заготовки	S	1,3	
4.	Расстояние до торца	W	136	
5.	Положение шариковой дорожки в шарошке	$M2$	53,23	0,035 -0,035
6.	Справочный размер	REF	16,99	0 0
Расчет угла изворота				
1.	Угол наклона цапфы, град	φ	33	15 0
2.	Смещение	e	10	0,25 0
3.	Расстояние до торца	W	136	
4.	Угол изворота, град	T'	5,011	
5.	Принимаем угол изворота, град	T	5,0	10 -10
Расчет высоты шариковой дорожки				
1.	Угол наклона цапфы (обратный), град	$90-\varphi$	57	15 0
2.	Смещение	e	10	0,2 0
3.	Угол изворота, град	T	5,0	10 -10
4.	Расстояние до торца	W	136	
5.	Положение шариковой дорожки в шарошке	$M2$	53,23	0,035 -0,035
6.	Диаметр шариковой дорожки в лапе	$E1$	60,02	0 -0,13
7.	Радиус шариковой дорожки в лапе	$X1$	7,51	0,025 0,025
8.	Высота шариковой дорожки	$B9$	82,77	0,1 -0,05

Рисунок 4.2 – Данные по расчету долота (часть 1)

Расчет минимального перекрытия				
1.	Угол наклона цапфы, град	φ	33	15 0
2.	Смещение	e	10	0,2 0
3.	Угол изворота, град	T	5,0	10 -10
4.	Завес		3,2	
5.	Высота козырька	H2	144,45	0 -0,4
6.	Смещение центра радиуса обточки спинки лапы	R0	0	
7.	Толщина козырька	C2	2,1	
8.	Высота шариковой дорожки	B9	82,77	0,1 -0,05
9.	Диаметр шариковой дорожки в лапе	E1'	60,02	0 -0,13
10.	Радиус шариковой дорожки в лапе	X1'	7,51	0,025 0,025
11.	Расстояние от оси шариковой дорожки до торца основания цапфы	S0	53,2	0,25 0
12.	Диаметр роликовой дорожки лапы	A1	74,63	0 -0,05
13.	Диаметр расточки под уплотнение	A0	90,25	0,05 0
14.	Минимальная величина перекрытия козырька	-	3,83	0,1 0
15.	Минимальная длина козырька	-	11,67	0,1 0

Расчет спинки лапки под углом α				
1.	Угол наклона цапфы, град	φ	33	15 0
2.	Технологический размер высоты шариковой дорожки	BRH	84,07	0,5 0
3.	Толщина козырька	C2	2,1	
4.	Технологический размер	N	156	0,13 -0,13
5.	Технологический размер высоты козырька	H2'	145,75	0 -0,4
6.	Угол наклона спинки лапы, град	α	0,0	
7.	Диаметр шариковой дорожки в лапе	E1'	60,02	0 -0,13
8.	Радиус шариковой дорожки в лапе	X1'	7,51	0,025 0,025
9.	Расстояние от оси шариковой дорожки до торца основания цапфы	S1	53,2	0,25 0
10.	Технологический размер до спинки лапы	-	145,75	0,1 0

Рисунок 4.3 – Данные по расчету долота(часть 2)

Таблица 4.3 – Данные по вооружению шарошек долота

Шарошка, №	1			2		3	
	1	2	3	1	2	1	2
Ряд, №	Калибру ющий	Внутрен ний	Внутрен ний	Калибру ющий	Внутрен ний	Калибру ющий	Внутрен ний
Количество зубьев, шт	13	10	3	12	6	11	8
Высота зуба, мм	29	29	29	29	29	29	29
Притупл. зуба, мм	8	3...14	3...14	8	3...14	8	3...14
Ширина, мм	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9
Угол заостр., °	48	48	48	48	48	48	48
Площадь вершины зуба, мм ²	41	41	41	41	41	41	41

По полученным данным строим схему перекрытия забоя. Следующим этапом является проверка в расчетном модуле степени перекрытия забоя, которая показана на Рисунке 4.4. На схеме показана развертка для трех шарошек, которая выполнена с учетом всех конструктивных особенностей, таких как угловой изворот, параллельное смещение осей, геометрия вооружения. Также на Рисунках 4.1 и 4.4 показаны твердосплавные зубки, выходящие на калибрующую кривую с целью обеспечения сохранения номинального диаметра долота и калибрования стенки скважины в процессе бурения.

Следующим этапом является расчет вооружения шарошечного долота.

Для проектирования данного долота закладывается стандартная модификация основных узлов, поэтому отсутствует необходимость проведения дополнительных прочностных расчетов данных элементов, например лап, ниппельной замковой резьбы и т.д.

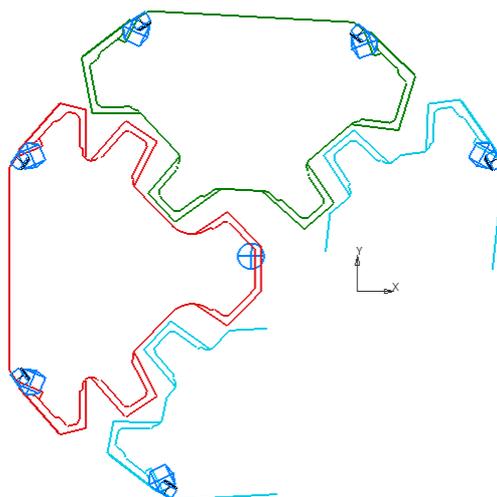


Рисунок 4.4 – Схема перекрытия забоя предполагаемого долота

Применяя программный комплекс SolidWorks, спроектированы и разработаны твердотельные модели данного долота, которые необходимы для обработки на высокотехнологичных станках с числовым программным управлением и проверки правильности расчетов. Сборочный чертеж шарошечного долота с модернизированным стальным вооружением пирамидальной формы, шарошки которой изготовлены из стали 19ХГНЗМА приведен на Рисунке 4.5.

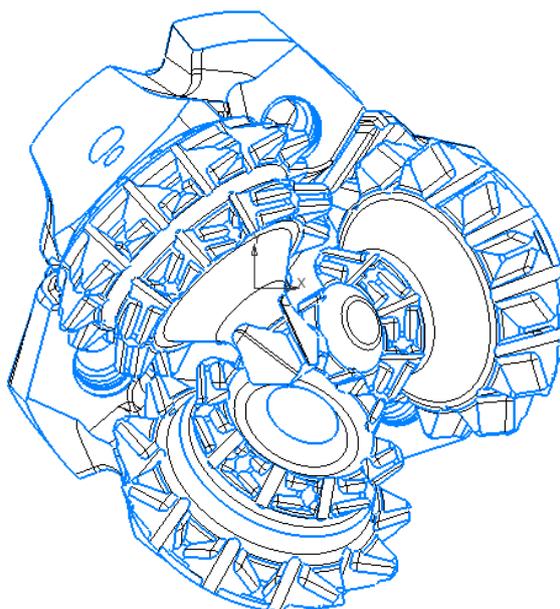


Рисунок 4.5 – Долото шарошечное

На данном чертеже не указано армирование зубьев твердосплавным материалом, т.к. данный процесс является специальным процессом, т.е. с использованием ручного труда и геометрия может варьироваться, и не закладывается в модели.

На разработанную конструкцию оформлен полный пакет конструкторской документации и присвоен заводской шифр БИТ 295,3 Z2GBSJ U700 с целью внедрения в серийное производство и прохождения промысловых испытаний.

При бурении и соответственно взаимодействии элементов вооружения с забоем при бурении в однородных горных породах долото, обладая всеми конструктивными особенностями шарошечных долот для мягких и мягко-средних горных пород, обеспечивает преобладание скалывающего эффекта с высокую эффективность разрушения горной породы. При прохождении пропластков, включающих валунно-галечные отложения за счет высокого запаса прочности основных рядов, особенно рядов расположенных в нейтральном сечении, обеспечивается высокая стойкость к ударным нагрузкам, что сохраняет остаточный ресурс вооружения, обеспечивая стойкость долота и эффективность бурения.

4.2 Опытно-промысловая отработка шарошечного долота с пирамидальным стальным вооружением внутренних рядов

Опытно-промысловые испытания шарошечного долота БИТ 295,3 Z2GBSJ U700 проводилось с целью определения ресурса и проверки технических характеристик породоразрушающего инструмента. В случае успешной отработки данной конструкции шарошечных долот будет рекомендовано серийный выпуск данной конструкции долот.

Порядок проведения промысловых испытаний следующий:

1. Согласование долотной программы между ООО НПП «БУРИНТЕХ» и компанией Заказчиком.

2. Согласование режимов бурения:

- применение ВСП в совокупности с ГЗД;
- частота вращения: не более 280 об/мин;
- осевая нагрузка на долото: не более 25 т;
- расход БПЖ: не более 60 л/сек;

3. Утверждение компоновки бурильной колонны и типа буровой установки:

- ДРУ-240РСФ (3/4; 1°29') / КОБ-240РС / П147/171 / СИБ 2.2 / ФТУ-176 / П133/147 / ТБПК-127×9,19 G-105 / П-152/133 / КС2-280 / П-133/152 / ТБПК-127×9,19.

- БУ: БУ-5000/320 ЭК-БМЧ / УНБТ-1180L;

4. Бурение осуществляется по стандартной долотной программе до проектного забоя с учетом прохождения осложненных зон. Проводится контроль момента на долоте и наличия скачков давления. В случае их возникновения в обязательном порядке проводится анализ шлама для определения включений валунно-галечных отложений на вибрационных ситах. В данных зонах требуется уменьшить режимные параметры для минимизации негативного влияния ударных нагрузок на элементы вооружения долота. Данная практика позволит снизить износ вооружения и сохранит высокий остаточный ресурс для продолжения бурения в дальнейшем.

5. При достижении проектного забоя и подъема долота проводится осмотр состояния долота и описание износа по стандартному коду IADC, фиксируются параметры: механическая скорость бурения, общее время бурения и циркуляции.

По результатам работ составляется отчет, проверяется сходимость теоретических и стендовых исследований с промысловыми испытаниями.

В Таблице 4.1 приведены фактические результаты опытно-промысловой отработки шарошечного долота БИТ 295,3 Z2RSJ U700 с серийным номером №2542.

Таблица 4.1 – Фактические данные опытно-промысловых работ

Маркировка:	БИТ 295,3 Z2RSJ U700 № 2542	
Куст / Скважина:	207 / 1110	
Интервал бурения:	30	753
Проходка	723	
Зенит.угол / азимут смещение:	43,59 / 220,84 / 355,92	
Т бурения:	15,1	
Т циркуляции:	22,89	
V общее, м/ч	47,8	
Режим бурения	2-25 / 155 / 70	
Параметры раст-ра	1,18 / 39 / 7,5	
Тип ВЗД:	ДРУ-240РСФ (3/4) (1°29')	
Ост. КНБК:	ДРУ-240РСФ (3/4; 1°29') / КОБ-240РС / П147/171 / СИБ 2.2 / ФТУ-176 / П133/147 / ТБПК-127×9,19 G-105 / П-152/133 / КС2-280 / П-133/152 / ТБПК-127×9,19	
Тип БУ / Насос	БУ-5000/320 ЭК-БМЧ / УНБТ-1180L	
IADC:	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-TD	
Комментарии:	Долото пригодно для дальнейшего применения	
Насадки:	12,7мм*1шт / 15,9мм*3шт	

Визуализация процесса бурения (гистограмма) с основными показателями приведена на Рисунке 4.6.

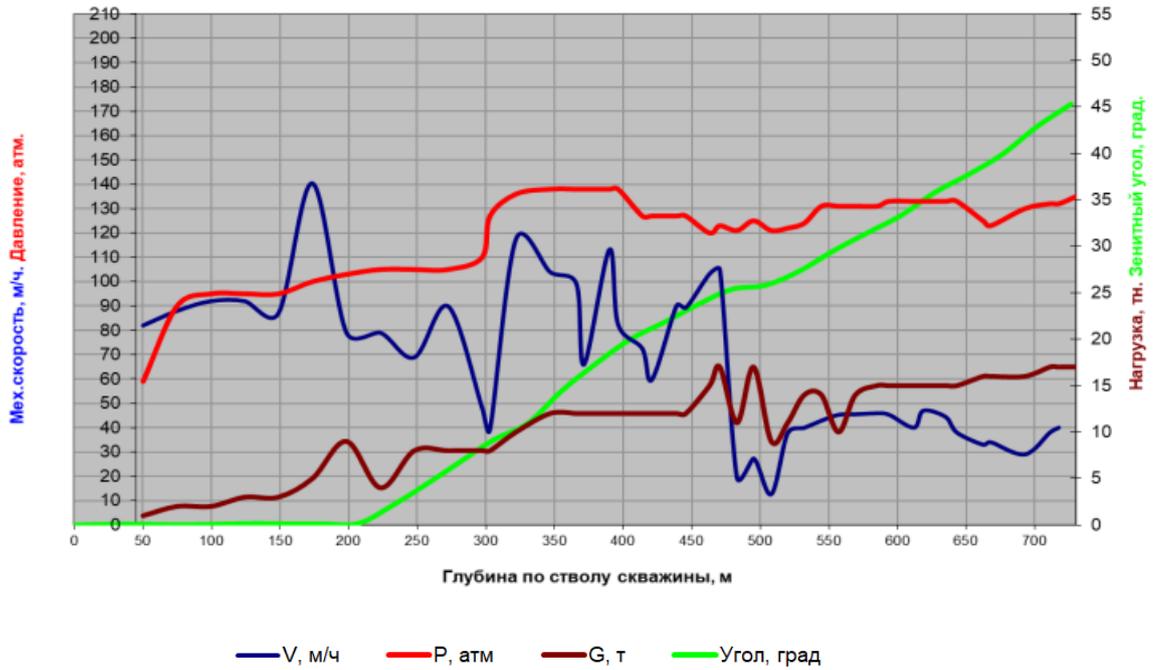


Рисунок 4.6 – Данные по опытно-промысловой отработке

По данным гистограммы, в интервале бурения 250-320 м наблюдается снижение режимных параметров, связанным с прохождением осложненных участков для снижения воздействия на вооружение с последующим набором, как режимных параметров, так и механической скорости проходки.

Фотографии шарошечного долота до спуска и после подъема приведены на Рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Состояние долота до спуска и после подъема

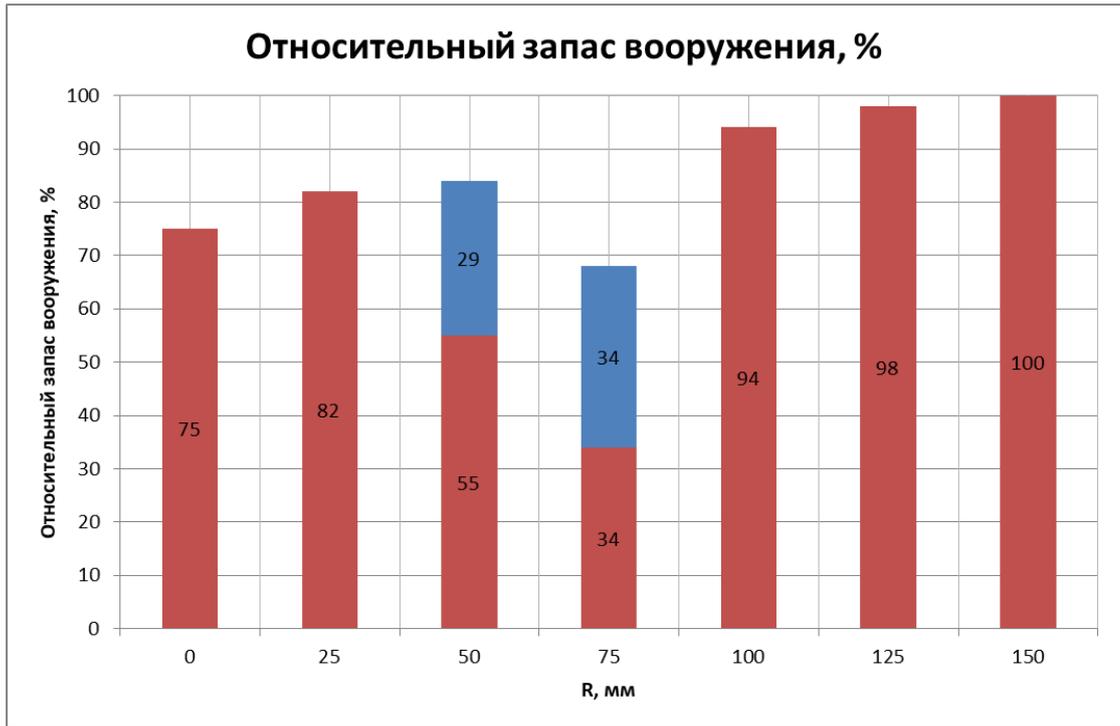


Рисунок 4.8 – Относительный запас вооружения БИТ 295,3 Z2RSJ U700
(IADC 117)

Износ долота БИТ 295,3 Z2RSJ U700 при средней скорости проходки 47,8 м/ч: 0-0-NO-A-EEE-IN-RR-TD. Для долота БИТ 295,3 Z2RSJ U700 рассчитан относительный запас вооружения (Рисунок 4.8) по указанным в работе формулам. Наблюдается прирост относительного запаса вооружения на величину от 29 до 34 % в зависимости от ряда шарошки долота, достигнутый за счет внедрения пирамидальной геометрии зубьев внутренних рядов в совокупности с изготовлением из долотной стали 19ХГНЗМА. Увеличение механической скорости проходки за долбление при аналогичных режимных и горно-геологических параметрах свидетельствует о сохранении средней удельной эффективности разрушения забоя. На данный момент проведено более 50 успешных отработок указанной конструкции с внедрением в серийное производство (приложение Г, Ж).

По результатам работы обеспечено повышение производительности бурения мягких, осложненных валунно-галечными отложениями, горных

пород путем применения шарошечных долот с конструктивным усилением внутренних рядов.

Приложение №2.3
к договору № 1711316/1714Д

АКТ
сдачи-приемки оказанных услуг
по отработке породоразрушающего инструмента при бурении
на скважине № 1110 куста № 207 Ванкорского месторождения

Комиссия в составе:
1. Главный специалист ОСЭБ УСБ ООО «РН-Ванкор»

Шилов А.И.

2. Инженер ООО НПП «БУРИНТЕХ»

Назаров С.Р.

Составили настоящий Акт в том, что услуги ООО НПП «БУРИНТЕХ» по договору №1711316/1714Д от 27.12.16 г. по технологическому сопровождению отработки долот оказаны в соответствии с договором и в полном объеме, исполнительная документация передана, замечания к Исполнителю отсутствуют.

Отработка долот:

Диаметр долота, мм	Типоразмер долота	Заводской номер	Интервал бурения, м		Проходка за интервал, м
			от	до	
295,3	295,3 Z2RSJ U700	2542	30	753	723

Общая проходка по скважине долотом, диаметром 295,3мм, составила: 723м.

Механическая скорость в интервале 30-753м, составила: 47,8м/ч.

Использованное оборудование:

Доска отворота КДДС-295,3/328 №3471

Насадки установленные на долоте: 4х12,7мм

Калибр кольцо ККН-295,3мм

Сдал:
Представитель Исполнителя:
Инженер ООО НПП «БУРИНТЕХ»



Назаров С.Р.

Принял:
Представитель Заказчика:
Главный специалист ОСЭБ УСБ ООО «РН-Ванкор»



Шилов А.И.

Рисунок 4.9 – Акт сдачи приемки услуг

4.3 Разработка методики применения шарошечных долот при бурении валунно-галечных отложений

В рамках комплексной работы по увеличению эффективности применения шарошечных долот необходимо рассмотреть вопрос о введении коррекции в существующий регламент по применению шарошечных долот. Это связано с тем, что главным выходным параметром при подборе оптимального режима бурения является достижение наибольшей механической скорости проходки в заданном интервале. Однако, данный подход не учитывает скорость износа вооружения при работе в условиях повышенных нагрузок, в том числе ударного характера, которые могут привести к катастрофическому износу вооружения на начальных этапах работы долота, что снизит эффективность применения породоразрушающего инструмента.

Проведение ряда испытаний при различных осевых нагрузках и скоростях вращения является наиболее надежным способом определения оптимальных значений для достижения максимальной механической скорости.

В методическое руководство «МР ЦРБИ 06-2016 Регламент по применению 3-х шарошечных долот производства ООО НПП «БУРИНТЕХ», внесли дополнительный пункт:

При использовании шарошечных долот в горно-геологических условиях, состоящих из мягких, мягко-средних и средних по твердости горных пород с включениями валунно-галечных отложений, в которых размер фракции сопоставим с размером единичного элемента вооружения и/или окремелелых пропластков необходимо выполнять следующие рекомендации для эффективной эксплуатации шарошечных долот:

- учитывать неоднородность горно-геологического разреза, ориентируясь в подборе режимных параметров бурения на долотную

программу, а также на отработки в схожих горно-геологических условиях аналогичных типов инструмента;

- при изменении горно-геологического разреза проводить подбор оптимального режима бурения, при котором достигается максимальная скорость проходки при минимальной осевой нагрузке;

- контролировать параметры момента на роторе и давления на стояке (при работе с ГЗД) и в случае изменения абсолютных значений свыше статистических колебаний проводить контроль прохождения зон с возможным присутствием валунно-галечных или окремнелых пропластков по шламу, выходящему из скважины на вибрационных ситах;

- при обнаружении вышеуказанных фракций выдать рекомендации по снижению осевой нагрузки и частоты вращения до стабилизации момента на роторе и давления на стояке (при работе с ГЗД);

- после прохождения интервала, осложненного валунно-галечными и/или окремнелыми пропластками повторно провести подбор оптимального режима бурения для продолжения высокоэффективного бурения;

Данные рекомендации носят справочный характер и не могут указываться с граничными значениями, как по режимным параметрам, так и по временным параметрам ввиду геологической неоднородности горных пород, в совокупности с применением данного методического руководства к широкому диапазону и типодиаметрам шарошечных долот.

4.4 Выводы по главе 4

1. Разработана конструкция бурового шарошечного долота с пирамидальной геометрией стального вооружения с изготовлением шарошек из долотной стали 19ХГНЗМА.

2. Проведены опытно-промысловые работы, которые подтвердили работоспособность предложенной конструкции и показали высокую эффективность работы.

3. На основании опытно-промысловых работ и анализа износа вооружения доработано методическое руководство с целью снижения износа при работе в осложненных горно-геологических условиях.

4. Рассчитан относительный запас вооружения по рядам для шарошечного долота с пирамидальной конструкцией зубьев внутренних рядов, прирост которого на значение от 29 % до 34 %, позволил обеспечить прохождение интервала под кондуктор без существенного износа внутренних рядов

5. Конструкция шарошечного долота БИТ 295,3 Z2RSJ U700 и изменения в методическое руководство «МР ЦРБИ 06-2016 Регламент по применению 3-х шарошечных долот производства ООО НПП «БУРИНТЕХ» внедрены в серийное производство, что подтверждается актами о внедрении и данными, об отработках указанного типа долот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повышена эффективность бурения мягких горных пород, осложненных валунно-галечными отложениями, путем применения шарошечного долота с пирамидальным стальным вооружением с увеличенным относительным запасом вооружения внутренних рядов.

2. Установлено, что пирамидальная геометрия зубьев обеспечивает наименьшие суммарные напряжения в сравнении со стандартной геометрией и снижает относительную массовую потерю металла при ударных нагрузках более чем в 2 раза за счет наличия ребер жесткости, образующих восьмигранную пирамиду, и изготовления шарошек из стали 19ХГНЗМА.

3. Разработана и внедрена в серийное производство конструкция шарошечного долота БИТ 295,3 Z2GBSJ U700, отличающаяся пирамидальным исполнением зубьев внутренних рядов, выполненных из стали 19ХГНЗМА, для применения в условиях мягких горных пород с включениями валунно-галечных отложений.

4. Разработана методика по применению шарошечных долот для бурения разреза мягких горных пород, осложненных валунно-галечными отложениями с внедрением в методическое руководство «МР ЦРБИ 06-2016 Регламент по применению 3-х шарошечных долот производства ООО НПП «БУРИНТЕХ».

5. В результате выполненных опытно-промысловых испытаний подтверждено, что применение шарошечного долота с пирамидальным стальным вооружением внутренних рядов увеличивает износостойкость вооружения без снижения средней эффективности разрушения горной породы. Секция под кондуктор пробурена за один рейс, увеличена механическая скорость проходки с 26,9 м/ч до 47,8 м/ч при бурении интервалов, осложненных валунно-галечными отложениями в Восточно-Сибирском регионе.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- PDC – polycrystalline diamond compact;
TSP – thermo stable polycrystalline;
РСД – режуще-скалывающее действие;
ГТИ – геолого–технические исследования;
ВЗД – винтовой забойный двигатель;
ГЗД – гидравлический забойный двигатель;
ВСП – верхний силовой привод;
КНБК – компоновка низа бурильной колонны;
ДУ – дифференциальное уравнение;
ПФЭ – полный факторный эксперимент;
БТ – бурильные трубы;
ОК – обсадная колонна;
ПРИ – породоразрушающий инструмент;
БРС – быстроразъемное соединение;
ПО – программное обеспечение;
СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость;
СПО – спускоподъемные операции;
МКЭ – метод конечных элементов;
НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы;
ОПИ – опытно-промышленные испытания;
МСП – механическая скорость проходки;
ХТО – химико-термическая обработка;
БПЖ – буровая промывочная жидкость;
IADC – international association of drilling contractors
KREVs – killorevolutions

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
2. Акчурин Х.И. Исследования эффективности бурения долотами непрерывного действия совершенствованием схем размещения вооружения: дис. ... канд. тех. наук. – Уфа, 1983. – 203 с.
3. Алексеев Л.А. Энергетические принципы разработки конструкций и режима отработки породоразрушающего инструмента режуще-скалывающего действия для бурения: дис. ... докт. тех. наук. – Уфа. 1986. – 477 с.
4. Алексеев Ю.Ф. Повышение эффективности работы шарошечных долот на основе изучения механических и абразивных свойств горных пород в свете решения задач АСУТП бурения: дис. докт. техн. наук. – Уфа, 1985. – 409 с.
5. Антипов В.И., Нагаев В.Б., Седых А.Д. Физические процессы нефтегазового производства. Т.1. – М.: Недра, 1998. – 372 с.
6. Арефьева, В.В. (Чулкова, В.В.). Оптимизация программы бурения за счет применения новых конструкций долот режущего типа / В.В. Арефьева (В.В. Чулкова), С.В. Величков.// Инженер-нефтяник. — 2010. — № 2. — 26 с.
7. А.с. 1180476. Шарошка бурового долота /Б.Н. Трушкин, М.М. Абдуллин, А.Н. Попов и др.; Оpubл. 23.09.85 //Изобретения. – 1985. – № 35.
8. А.с. 1627643. Буровое трехшарошечное долото / А.Н. Попов, Б.Н. Трушкин, А.В. Торгашов и др.; Оpubл. 15.02.91 //Изобретения. – 1991. – № 6.
9. А.с. 1810462. Шарошечное долото / А.Н. Попов, Б.Н. Трушкин, С.П. Баталов и др.; Оpubл. 23.04.93 //Изобретения. – 1993. – № 15.
10. Бабаев С.Г. Надежность и долговечность бурового оборудования.– М.: Недра, 1974. – 182 с.

11. Богомолов Р.М. Буровой инструмент. Энциклопедия изобретений (1916-2016 гг.). Часть 1 / Р.М. Богомолов, Н.В. Носов. - М.: Инновационное машиностроение, 2015. - 399 с.
12. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Технология бурения нефтяных и газовых скважин. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 680 с.
13. Булатов А.И., Аветисов А.Г. Справочник инженера по бурению. – М.: Недра, 1985. – 190 с.
14. Булатов А.И., Проселков Ю.М., Шаманов С.А. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин: Учебник для вузов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 1007 с.
15. Булатов В.В. Механизм разрушения горных пород при сверхглубоком бурении.– Новосибирск: Наука, 1966. – 191 с.
16. Буровые долота, калибраторы, центраторы. – Изд-во ОАО "Волгабурмаш", 2007. – 49 с.
17. Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование: Научное издание / Коллектив авторов; под общей редакцией А.М. Гусмана и К.П. Порожского. – Екатеринбург: УГГГА, 2002. – 600 с.
18. Вадецкий Ю.В. Бурение нефтяных и газовых скважин. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 352 с.
19. Васильев А.А., Сериков Д.Ю., Близнюков В.Ю. Совершенствование буровых долот различных типов / Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море: научн.-техн. журнал. –М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2019. - №6. – С.28-31.
20. Витке В. Механика скальных пород. – М.: Недра, 1990. – 439 с.
21. Владиславлев В.С. Теория работы породоразрушающих инструментов.– М.: МРГИ, 1982. – 76 с.
22. Войтенко В.С. Прикладная геомеханика в бурении. – М.: Недра, 1990. – 252 с.

23. Гарнье, А.Ж., Ван-Лиген Н.Х. Факторы, влияющие на механическую скорость проходки с увеличением глубины. – М.: Недра, 1980. – 33 с.
24. Гилязов Р.М. Совершенствование техники и технологии бурения боковых стволов: дис. канд. техн. наук. – Уфа, 1999. – 140 с.
25. Говзич, А. Круглый стол по буровым долотам / А. Говзич, Р. Frew, Б. Куилльер. // Rogtec. — 2007. — Режим доступа: http://www.varelintl.com/content/released/ROGTEC_DrillBit_Roundtable_Oct.pdf.
26. Головкин С.А. Повышение эффективности бурения шарошечными долотами с твердосплавным вооружением путем совершенствования его размещения и геометрии: дис.... канд. тех. наук. – Уфа, 1988. – 165 с.
27. ГОСТ 20692-2003 «Долота шарошечные. Технические условия».
28. Даутов, М.Н. Мы являемся серьезными конкурентами для иностранных производителей [Электронный ресурс] / М.Н. Даутов. // Oil-Gas. — июль 2011. — <http://www.oil-gas.ru/interview/id295/>.
29. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир–1975. – 543 с.
30. Игнатов В.И. Организация и проведение эксперимента в бурении. – М.: Недра, 1978. – 94 с.
31. Иогансен К.В. Спутник буровика: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 303 с.
32. Ильский А.Л., Миронов Ю.В., Чернобыльский А.Г. Расчет и конструирование бурового оборудования. – М.: Недра, 1985.
33. Ишбаев Г.Г. Новые системы промывки и вооружения бурового и специального инструмента режуще-скалывающего действия: дис. ... д-ра. тех. наук: 05.15.10 / Ишбаев Гниятулла Гарифуллович. – Уфа, 1997. – 274 с.
34. Ишбаев Г.Г. Повышение эффективности бурения долотами режуще-скалывающего действия совершенствованием системы промывки:

дис. ...канд. тех. наук: 05.15.10 / Ишбаев Гниятулла Гарифуллович. – Уфа, 1989. – 146 с.

35. Ишбаев Г.Г., Балута А.Г. и др. Проводка наклонно-направленных скважин долотами PDC производства ООО НПП «БУРИНТЕХ» / Бурение и нефть. – 2004. – №6. – С. 12 – 13.

36. Ишбаев Г.Г., Мавлютов М.Р., Алексеев Л.А., Акчурин Х.И., Галиакбаров В.Ф. Исследование энергетики разрушения и доразрушения горных пород гидродинамическом воздействием / Разрушение горных пород при бурении скважин: Тез. докл. / V Всесоюз. конф. – Уфа, 1990. – С. 130– 132, т.1.

37. Ишбаев Г.Г. НПП «БУРИНТЕХ»: от научного предвидения до внедрения разработок, перевернувших буровую отрасль // Бурение и нефть. — 2019. — № 6. С. 4–12..

38. Ишемгузин Е.И. Регрессионный анализ и планирование эксперимента при оценке надежности буровых и нефтепромысловых машин. – Уфа.: Уфимск. нефт. ин-та, 1984 – 79 с.

39. Калинин А.Г. Бурение наклонных и горизонтальных скважин: справочник / А. Г. Калинин [и др.]. – М.: Недра, 1997. – 648 с.

40. Калинин А.Г., Левицкий А.З., Никитин Б.А. Технология бурения разведочных скважин на нефть и газ. – М.: Недра, 1998. – 325 с.

41. Карташов Ю. М. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.

42. Кейн С.А. Современные методы проектирования и управления траекториями горизонтальных скважин / Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2008. – №4. – С. 10 – 14.

43. Кершенбаум В.Я., Торгашев А.В., Мессер А.Г. Буровой породоразрушающий инструмент. – М.: Нефть и газ, 2003.

44. Кожевников Д.В. Режущий инструмент / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов и др. - М.: Машиностроение. - 2014. - 520 с.

45. Кириллин В.И. Выбор и оптимизация схемы промывочных устройств шарошечных долот. – М.: ВНИИОЭНГ, 1991. – 128 с.
46. Клепиков Н.П., Соколов С.Н. Анализ и планирование экспериментов методом максимума подобия. – М.: Наука, 1964. – 184 с.
47. Коваленко Ю.И., Литвинов А.И. Совершенствование гидравлических характеристик промывочной системы гидромониторных шарошечных долот / Нефтяное хозяйство. – 1984. – № 10. – С.19 – 20.
48. Козловский Е.А. Оптимизация процесса разведочного бурения. – М.: Недра, 1975. – 303 с.
49. Левинсон Л. М., Акбулатов Т.О., Акчурин Х. И. Управление процессом искривления скважин. Учебное пособие. – Уфа: УГНТУ, 2000.
50. Леонов Е.Г., Исаев В.И. Гидроаэромеханика в бурении: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987. – 304 с.
51. Лозгачев Е.Г., Нагапетьян Л.В. Исследование законов распределения показателей прочностных свойств горных пород // Технология бурения нефтяных и газовых скважин: Межвузовский научно-тематический сб. – Уфа: УНИ, 1979. – С. 63-66.
52. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. – Л.: Недра, 1970. – 528 с.
53. Любимов Н.И. Принципы классификации и эффективного разрушения горных пород при разведочном бурении. – М.: Недра, 1967–317 с.
54. Мавлютов М.Р. Гидравлика призабойной зоны скважины в связи с процессами разрушения горных пород // Технология бурения нефтяных и газовых скважин: Межвузов. научн.- тематич. сб. – Уфа, 1987. – С. 81 – 92.
55. Мавлютов М.Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
56. Мавлютов М.Р. Технология бурения глубоких скважин. Учебное пособие для вузов. – М.: Недра, 1982. – 287 с.

57. Маковой Н. Гидравлика бурения. Производственное издание. Перевод с румынского.– М.:Недра, 1986. – 536 с.
58. Масленников И.К. Буровой инструмент. Справочник. – М.: Недра, 1989. – 438 с.
59. Мирзаджанзаде А.Х., Сидоров Н.А., Ширинзаде С.А. Анализ и проектирование показателей бурения. – М.: Недра, 1976. – 237 с.
60. Мокшин А.С. Шарошечные долота / А.С. Мокшин, Ю.Е. Владиславлев, Э.Л. Комм. - М.: Недра, 1971.- 216 с.
61. Нефтегазовый комплекс Восточной Сибири и Дальнего Востока: тенденции, проблемы, современное состояние // Эдер Л.В., Филимонова И.В., Моисеев С.А. // Бурение и нефть. – 2015. - №12 – С.3-12.
62. Оганов Г. Проекты будущего для ТЭКа / Бизнес и партнер. – 2012. – №3. – С. 60 – 61.
63. Обзор нефтесервисного рынка России – 2018 / Исследовательский центр компании «Делойт» в СНГ / - Москва, 2019.
64. Обзор нефтесервисного рынка России – 2019 / Исследовательский центр компании «Делойт» в СНГ / - Москва, 2019.
65. Пат. 2215111 РФ. Буровое трехшарошечное долото /Р.А. Исмаков, А.Н. Попов, Ю.Г. Матвеев и др. – Оpubл. 27.10.03 //Изобретения. – 2003. - № 30.
66. Пат. 2361998 РФ Буровое трехшарошечное долото /А.Н. Попов, А.И. Могучев, М.А. Попов. – Оpubл. 20.07.2009. – Бюл. № 20.
67. Пат. 2404353 РФ Трехшарошечное долото /А.Н. Попов, Ю.Г. Матвеев, А.И. Могучев, Ф.З. Булюкова. – Оpubл. 20.11.2010. – Бюл. № 32.
68. Пат. 2303118 РФ Буровое долото / А.Н. Попов, Ю.Г. Матвеев, Р.А. Исмаков, А.А. Чехов. - Оpubл. 20.07.2007. – Бюл. № 20.
69. Попов А.Н., Спивак А.И., Акбулатов Т.О., и др. Технология бурения нефтяных и газовых скважин. Учебник для вузов. Под общ.ред. А.И.

Спивака и Л.А. Алексеева. 3-е изд., испр. и доп. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 508 с.

70. Победоносцева, Н.Н. Экономическая эффективность алмазных долот/Н.Н. Победоносцева, В.И. Егоров, Б.А. Мац. — М.: Недра, 1972.—44 с.

71. Породоразрушающие элементы шарошечных долот / Под ред. А.Н. Павловского. - М: ВНИИПИ, 1988 - 47 с.

72. Протоdjяконов М.М. Свойства горных пород и методов их определения. – М.: Недра, 1969. – 392 с.

73. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 228 с.

74. Разработка метода плазменно – порошковой наплавки, с целью увеличения ресурса работы шарошечных / К.Р. Валямов, В.В. Мыкалкин / Сборник трудов международной научно-технической конференции – Краснодар: Изд-во Издательский дом «Юг», 2017. – 144-146 с.

75. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

76. Сердюк Н. И. Расчёты в бурении : справ. пособие / Н. И. Сердюк, Р. А. Ганджумян, А. Г. Калинин. – М.: РГГРУ, 2007. – 668 с.

77. Симонянц, С.Л. Классификация и выбор буровых долот / С.Л. Симонянц, И.В. Мнацаканов, М.С. Салихов. // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. — 2011. — № 2. — С. 9-11.

78. Симонянц, С.Л. О выборе рациональных типов буровых долот / С.Л. Симонянц, М.С. Салихов. // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. — 2010. — № 3. —С.17.

79. Сериков Д.Ю. Повышение эффективности работы шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2014. - №1. - С. 29.

80. Сериков Д.Ю. Анализ конструкций шарошечных буровых долот с косозубым вооружением / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2014. - №1. - С. 28.
81. Сериков Д.Ю., Гринев А.М. Исследование проскальзывания вооружения шарошечных буровых долот / Территория Нефтегаз. 2016. №7-8.
82. Современные шарошечные долота, проблемы их совершенствования и повышения надежности /А.В. Торгашов, В.А. Барвинок, И.К. Бикбулатов и др. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2000. – 190 с.
83. Справочник по геологии нефти и газа / [И. И. Аммосов, Е. А. Барс, Т. А. Ботнева и др.]; Под ред. Н. А. Еременко. - Москва: Недра, 1984. - 480 с.
84. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений / М.Г. Абрамзон, Б.В. Байдюк, В.С. Зарецкий и др. – М.: Недра, 1984. – 207 с.
85. Старцев А.А., Попов А.Н., Спивак А.И., Белов Г.П. Выбор рациональных типов долот по данным опорно-технологических скважин. В сб. «Технология бурения нефтяных и газовых скважин». – Уфа, 1975. – 104 с.
86. Технологии, обусловившие быстрое внедрение техники бурения на обсадной колонне / Нефтегазовые технологии. – 2004. – №5. – С. 46 – 53.
87. Трехшарошечные буровые долота: Каталог. – Изд-во ООО "НПП Буринтех", 2010. – 24 с.
88. Трушкин Б.Н. Исследование работы элементов вооружения шарошечных долот при бурении: дис. канд. техн. наук. – Уфа, 1974. – 186 с.
89. Трушкин Б.Н., Мавлютов А.М., Попов А.Н. Программа графоаналитического анализа формирования поверхности забоя венцами шарошек // Актуальные проблемы проектирования, производства и эксплуатации изделий машиностроения: Докл. Всеросс. Науч.-техн. конф. – Самара: Изд-во УГЛ СФМГУП, 2001. – С. 118-125.

90. Трушкин О.Б. Анализ силовых и энергетических параметров работы породоразрушающих инструментов на базе разработанного автономного цифрового измерительного устройства: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.13 / Трушкин Олег Борисович. – Уфа, 2006. – 202 с.
91. ТУ 3664-013-50783875-2014 – Технические условия «Долота шарошечные» / ООО НПП «БУРИНТЕХ». - 2014. – 26 с.
92. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 310 с.
93. Федоров В.С. Проектирование режимов бурения. М.: Гостоптехиздат. 1958. – 220 с.
94. Шарипов, А.Н. Долота для бурения твердых пород [Электронный ресурс] / А.Н. Шарипов, Р.Р. Мингазов. // Бурение и нефть. — 2012. — № 12.
95. Шрейнер Л.А., Петров О.П., Якушев В.П. и др. Механические и абразивные свойства горных пород. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 199 с.
96. Чулкова, В.В. Опыт применения долот PDC в условиях перемежающихся по твердости горных пород Урало-Поволжского региона / В.В. Чулкова. // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. — 2012. — № 2. — С. 12-13.
97. Ясашин В.А. Конструкторские и технологические методы повышения эффективности работы буровых шарошечных долот большого диаметра: дис. докт. техн. наук. – Москва, 2009. – 219 с.
98. Электронный ресурс, URL: www.art-osnastka.ru.
99. Bellin, F. The current state of PDC bit technology / F. Bellin. // World Oil. — сентябрь 2010. — P. 41-42.
100. Besson A., Burr B., Dillard S. On the cutting edge // Oilfield review. – 2000, № 3. – P. 36-57.
101. Centala. P, Challa. V, Durairajan. B. Bit design – top to bottom // Oilfield review. – 2011, № 2. – P. 4-17.

102. Cholet H., Baron G., Larayres R., Brisac J. Unique bit design improves hydraulics and performance // World Oil. – October, 1971.

103. Horizontal well technology // S. Joshi. – PennWell Publishing Company. – 1991. – 535 p.

104. Kennedy J.L. Drilling around the World // Oil and Gas J. –1974.– Vol.72, № 38. – P.128-148.

105. Reed Hycalog: Каталог буровых долот. – Изд-во A Grant Prideco Company – 33 с.

106. Huges Christensen: Каталог буровых долот. – Изд-во Бейкер Хьюз Инкорпорейтед, 2001. – 45 с.

Приложение А
(справочное)

Список опубликованных работ

Статьи из журналов, рекомендованных ВАК РФ:

1. Разработка нового типа геометрии стального вооружения шарошечных долот // Г.Г. Ишбаев, К.Р. Валямов, // Бурение и нефть. – 2023. - №11 – С.44-46.

2. Актуальность адаптации применения шарошечных долот при бурении в переслаивающихся горных породах // К.Р. Валямов, Г.Г. Ишбаев, // Нефтяная провинция.-2023.-№4(36).- С. 359-368.

3. Рассмотрение причин вывода из эксплуатации шарошечных долот // К.Р. Валямов, Г.Г. Ишбаев, // // Нефтяная провинция.-2024.-№1(37).-С. 240-250.

4. Инновационные технологии и опыт нефтесервисной компании «БУРИНТЕХ» // Г.Г. Ишбаев, А.Г. Балута, А.А. Саломатин, В.В. Мыкалкин, К.Р. Валямов, // Бурение и нефть. – 2024. - №4 – С.6-9.

Патенты РФ:

1. Патент РФ на изобретение №2704049. Долотная сталь / Валямов К.Р., Ишбаев Г.Г., Лыжин В.В., Мыкалкин В.В., Гурьев И.С., Балута А.Г., оп. 23.10.2019 г.

2. Патент РФ на полезную модель №212334. Шарошка бурового долота / Ишбаев Г.Г., Валямов К.Р., Мыкалкин В.В., Гурьев И.С., оп. 18.07.2022 г.

Статьи из прочих изданий:

1. Износ шарошечных долот при бурении скважин / К.Р. Валямов, В.В. Мыкалкин, Г.Г. Ишбаев / Современные технологии в нефтегазовом деле – 2017: сборник трудов международной научно-технической конференции в 2-х т. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – Т. 1. –С. 229-232.

2. Значимость выбора породоразрушающего инструмента для бурения скважин при разработке месторождений/ К.Р. Валямов, О.О. Валямова, В.В. Мыкалкин / VII Международной научно-практической конференции

молодых ученых «Экологические проблемы нефтедобычи-2018», / сборник трудов международной научно-практической конференции – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. – С. 14-15.

3. Methods of improving rop and resource characteristics of roller cone bits / K.R. Valyamov, V.V. Sokolova / Материалы 70-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. Т.2 – С. 406.

4. Рассмотрение методов повышения ресурса вооружения шарошечных долот / К.Р. Валямов, В.В. Мыкалкин / Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы нефтегазового оборудования» / сборник трудов международной научно-технической конференции – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. . – С. 64-68.

5. Адаптация применения долот дробяще-скалывающего действия к современным условиям бурения нефтяных и газовых скважин / К.Р. Валямов, В.В. Мыкалкин / 73-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2019» / РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – Москва, 2019. – Т.1.-С. 435-436.

6. Актуальность подбора шарошечных долот при бурении наклонно-направленных нефтяных и газовых скважин / К.Р. Валямов / XIV Международная научно-практическая конференция молодых ученых, «Актуальные проблемы науки и техники-2021»: сборник трудов международной научно-практической конференции в 2-х т. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. – Т. 1. – С.100-101.

7. Актуальность оценки износа шарошечных долот при бурении нефтяных и газовых скважин / К.Р. Валямов / Научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и инновации в области строительства и ремонта скважин»: сборник тезисов докладов – Бугульма: Институт ТатНИПИНефть, 2022. – С. 44 – 45.

8. Влияние режимных параметров бурения на эффективность применения шарошечного породоразрушающего инструмента / К.Р. Валямов, / 73 научно – техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ / сборник трудов международной научно-технической конференции – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. Т.1 – С. 57.

9. Влияние режимных параметров бурения на показатели отработки шарошечных долот / К.Р. Валямов, И.С. Гурьев / Международная научно – практическая конференция, посвященная 90-летию начала добычи первой башкирской нефти: Сборник трудов – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. – С. 274-275.

Прочие публикации:

1. Учебно-методическое электронное издание «Шарошечные долота. Основные узлы. Принцип работы. Область применения» / Г. Г. Ишбаев, Р. А. Исмаков, В.В. Мыкалкин, К.Р. Валямов / УГНТУ, каф. БНГС; Уфа: УГНТУ, 2023. - 1,43 Мб. - Текст: электронный, 27 с.

2. Методическое руководство «МР ЦРБИ 06-2016 Регламент по применению 3-х шарошечных долот производства ООО НПП «БУРИНТЕХ» изм.№556-22 от 27.10.2022г /Мыкалкин В.В., Рашитов И.З., Валямов К.Р. / ООО НПП «БУРИНТЕХ», 2022 – 28 с.

Приложение Б

(справочное)

Патент на изобретение «Долотная сталь»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2704049

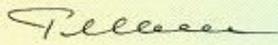
ДОЛОТНАЯ СТАЛЬ

Патентообладатель: **Общество с ограниченной ответственностью
Научно-производственное предприятие "БУРИНТЕХ" (ООО
НПП "БУРИНТЕХ") (RU)**

Авторы: **Валямов Карим Рамилевич (RU), Ишбаев Гниятулла
Гарифуллович (RU), Лыжин Вадим Васильевич (RU),
Мыкалкин Владимир Владимирович (RU), Гурьев Иван
Сергеевич (RU), Балута Андрей Григорьевич (RU)**

Заявка № 2018135018
Приоритет изобретения 03 октября 2018 г.
Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 23 октября 2019 г.
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 03 октября 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Г.П. Изrael



Приложение В

(справочное)

Патент на полезную модель «Шарошка бурового долота»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 212334

Шарошка бурового долота

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие "БУРИНТЕХ" (RU)*

Авторы: *Ишбаев Гниятулла Гарифуллович (RU), Валямов Карим Рамилевич (RU), Мыкалкин Владимир Владимирович (RU), Гурьев Иван Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022114890

Приоритет полезной модели 02 июня 2022 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 18 июля 2022 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 02 июня 2032 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю. С. Зубов

Приложение Г (справочное)

Акт внедрения конструкции шарошечного долота

Яуапллығы сикләнгән йәмғиәт
«БУРИНТЕХ»
Фәнни – производство
предприятияһы
450029, Рәсәй Федерацияһы,
Башҡортостан Республикаһы,
Өфө ҡалаһы, Юбилей урамы, 4/1
Тел.: (347) 246-08-72, факс: (347) 291-25-33
e-mail: bit@burinteh.com; www.burintekh.com
ИНН 0272010012



Общество с ограниченной
ответственностью
Научно-производственное предприятие
«БУРИНТЕХ»
450029, Россия,
Республика Башкортостан,
г.Уфа, ул.Юбилейная, 4/1
Тел.: (347) 246-08-72, факс: (347) 291-25-33;
e-mail: bit@burinteh.com; www.burintekh.com
ИНН 0272010012

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы
Валямова Карима Рамилевича

Мы, нижеподписавшиеся, первый заместитель генерального директора Ташбулатов Рустэм Фидайлович и главный конструктор Саломатин Андрей Александрович составили настоящий акт о том, что К.Р. Валямовым в процессе подготовки кандидатской диссертации было спроектировано шарошечное долото БИТ 295,3 Z2RSJ U700, которое внедрено в рабочий процесс и применяется в производственном процессе в ООО НПП «БУРИНТЕХ».

1-й заместитель генерального директора

Р.Ф. Ташбулатов

Главный конструктор

А.А Саломатин



Приложение Д (справочное)

Акт внедрения методического руководства

Яуапплығы сикләнгән йәмғиәт
«БУРИНТЕХ»
Фәнни – производство
предприятияһы
450029, Рәсәй Федерацияһы,
Башкортостан Республикаһы,
Өфө калаһы, Юбилей урамы, 4/1
Тел.: (347) 246-08-72, факс: (347) 291-25-33
e-mail: bit@burinteh.com; www.burintekh.com
ИНН 0272010012



Общество с ограниченной
ответственностью
Научно-производственное предприятие
«БУРИНТЕХ»
450029, Россия,
Республика Башкортостан,
г.Уфа, ул.Юбилейная, 4/1
Тел.: (347) 246-08-72, факс: (347) 291-25-33;
e-mail: bit@burinteh.com; www.burintekh.com
ИНН 0272010012

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы
Валямова Карима Рамилевича

Мы, нижеподписавшиеся, первый заместитель генерального директора Ташбулатов Рустэм Фидаилович и главный конструктор Саломатин Андрей Александрович составили настоящий акт о том, что К.Р. Валямовым в процессе подготовки кандидатской диссертации были внедрены новые методические указания по применению шарошечных долот в сложных горно-геологических условиях (осложнении разреза валунно-галечными отложениями) в МР 06-2016 «РЕГЛАМЕНТ ПО ПРИМЕНЕНИЮ III ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ ПРОИЗВОДСТВА ООО НПП «БУРИНТЕХ» в редакции от 27.10.2022г. Регламент используется при эксплуатации шарошечных долот производства компании ООО НПП «БУРИНТЕХ».

1-й заместитель генерального директора

Р.Ф. Ташбулатов

Главный конструктор

А.А Саломатин



ООО НПП «БУРИНТЕХ»

«УТВЕРЖДАЮ»
 Заместитель генерального
 директора - начальник
 Центра разработки
 ООО НПП БУРИНТЕХ»
 А.Г. Балута
 29.12.2016 г.

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

МР ЦРБИ 06-2016

«РЕГЛАМЕНТ ПО ПРИМЕНЕНИЮ П ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ
ПРОИЗВОДСТВА ООО НПП «БУРИНТЕХ»

Наименование должности	ФИО	Подпись	Дата
Разработчик(и) документа:			
Начальник отдела шарошечных долот	Мыкалкин В.В.		29.12.16
Ведущий инженер по породоразрушающему инструменту	Рашитов И.З.		29.12.16
Согласовано:			
Главный технолог Управления по бурению	Фатхутдинов Л.Р.		29.12.16
Начальник службы – Главный конструктор	Саломатин А.А.		29.12.16

2016 г.

Интегрированная система менеджмента ООО НПП «БУРИНТЕХ»	Регламент по применению III шарошечных долот производства ООО НПП «БУРИНТЕХ»	Издание: 3
--	--	------------

МР ЦР 06-2016

СОДЕРЖАНИЕ

1	Описание долот ООО НПП «БУРИНТЕХ»	3
1.1	Номенклатура долот и опции. Варианты номенклатуры.	3
1.2	Серии долот	7
1.3	Область применения долот по конструктивным группам для бурения в породах, классифицированных кодом IADC	9
2	Хранение долот	10
3	Процесс отработки долот	10
3.1	Подготовка скважины	10
3.2	Подготовка долота к бурению	10
3.3	Наворачивание долота	12
3.4	Спуск долота в скважину	13
3.5	Приработка долота	13
3.6	Пассивный тест	14
3.7	Активный тест	14
3.8	Момент	15
3.9	Нагрузка на долото	16
3.10	Частота вращения ротора	16
3.11	Наращивание инструмента	16
3.12	Оптимизация процесса бурения	16
3.13	Гидравлика	17
3.14	Разбуривание цементных пробок и мостов, обратных клапанов, башмаков обсадных колонн	17
3.15	Работа долота в обсаженном стволе скважины	17
4	Факторы, связанные с окончанием работы долота	18
4.1	Закупорка насадок	18
4.2	Образование сальника на долоте	18
4.3	Бурение более твердых пород и пропластков	18
4.4	Бурение в твердых породах	19
4.5	Потеря насадки (насадок)	19
4.6	Повреждение вооружения долота	19
4.7	Повреждение уплотнения и опоры	19
5	Система оценки износа отработанных шарошечных долот	20
5.1	Износ внутренних и наружных рядов	20
5.2	Характеристика износа	21
5.3	Местоположение	21
5.4	Уплотнение	22
6	Причина подъема долота	23
7	Справочные данные по наработке долот	24
	Лист регистрации изменений	28
	Лист ознакомления	29

Изв. № 556-22
от 27.10.22 г.

Приложение Е
(справочное)

Диплом конкурса «Надежда России»



Приложение Ж
(справочное)

Данные по отработке шарошечных долот БИТ Z2RSJ U700 за 2022 г

Шифр долота	№	Рейс	Проходка, м	Тб, ч	Тц, ч	U, м/ч	Тип ВЗД	Расход, л/с	Обороты, 1/мин	Примечание	Код износа IADC
Z2RSJ U700	2896	1	743,00	16,00	29,00	46,44	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-E-IN-RR-BHA
Z2RSJ U700	2897	1	764,00	15,75	27,75	48,51	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-2-WT,CT-A-E-IN-RR-TD
Z2RSJ U700	2898	1	781,00	16,25	29,00	48,06	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/20	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-WT,CT-A-E-IN-RR-BHA
Z2RSJ U700	2899	1	766,00	16,25	29,75	47,14	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-E-IN-RR-TD
Z2RSJ U700	2900	1	744,00	17,00	25,50	43,76	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-WT-A-E-IN-RR-TD
Z2RSJ U700	2901	1	767,00	17,00	24,50	45,12	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/0	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-EEE-I-RR-TD
Z2RSJ U700	2902	1	740,00	12,90	26,00	57,36	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-TD
Z2RSJ U700	2903	1	739,00	15,75	25,75	46,92	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	Ограничение нагрузки ННБ	2-1-WT,CT-A-E-IN-RR-TD
Z2RSJ U700	2904	1	741,00	14,50	26,50	51,10	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	нет ограничений	1-0-BT-M-EEE-I-RR-TD
Z2RSJ U700	3088	1*	743,00	16,75	27,75	44,36	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-WT,CT-A-E-IN-RR-TD
Z2RSJ U700	3089	1	751,00	17,00	31,50	44,18	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/20	Ограничение нагрузки ННБ	1-0-WT,CT-A-E-I-RR-TD
Z2RSJ U700	3090	1	755,00	17,25	33,50	43,77	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-BHA
Z2RSJ U700	3091	1	754,00	17,25	31,50	43,71	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/0	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-TD
Z2RSJ U700	3092	1	751,00	14,00	33,50	53,64	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-TD
Z2RSJ U700	3093	1	749,00	15,75	27,25	47,56	ДРУ-240РСФ	45-60	180-200/40	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-BHA

ZZRSJ U700	3094	1	754,00	16,50	34,75	45,70	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-CT-A-E-1-RR-TD
ZZRSJ U700	3095	1	741,00	17,25	31,00	42,96	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/20	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-TD
ZZRSJ U700	3287	1	744,00	16,00	25,25	46,50	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	0-1-CT,WT-A-E-1-RR-TD
ZZRSJ U700	3288	1	749,00	15,00	26,75	49,93	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-WT-A-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	3289	2	751,00	15,75	26,25	47,68	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-WT-A-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	3291	1	743,00	16,00	26,00	46,44	ДРУ- 240РСФ	45-60	240/0	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-WT-A-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	3292	1	742,00	16,00	30,00	46,38	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-WT-A-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	3293	1	746,00	17,25	27,50	43,25	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-TD
ZZRSJ U700	3294	1	746,00	15,75	28,00	47,37	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-TD
ZZRSJ U700	3295	1	774,00	16,00	27,00	48,38	ДРУ- 240РСФ	45-60	180-200/0	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-TD
ZZRSJ U700	3296	1	773,00	18,00	30,00	42,94	ДРУ- 240РСФ	45-60	180-200/0	Ограничение нагрузки ННБ	0-1-LT,WT-A-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	3297	1	773,00	17,25	28,75	44,81	ДРУ- 240РСФ	45-60	180-200/0	Ограничение нагрузки ННБ	1-2-ER,WT-A-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	3627	1	776,00	22	34,75	35,27	ропор	45-60	40	Роторная КНБК	0-0-NO-A-EEE-IN-RR-TD
ZZRSJ U700	3738	1	751,00	14,25	26,00	52,70	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/20	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-ER,WT-A-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	3740	1	774,00	14,75	30,00	52,47	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-ER,WT-A-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	3972	1	754,00	14,25	25,25	52,91	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-ER,WT-A-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	3998	1	753,00	14,75	28,75	51,05	ДРУ- 240РСФ	45-60	180- 200/20	Ограничение нагрузки ННБ	1-0-WT-A-E-0-PN-TD

ZZRSJ U700	3999	1	723,00	15,5	34,75	46,65	Дру- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-1-WT.RG-N-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	4000	1	724,00	16	26,75	45,25	Дру- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	1-0-WT-A-E-0-RR-TD
ZZRSJ U700	4001	1	736,00	15,75	39,25	46,73	Дру- 240РСФ	45-60	180- 200/40	Ограничение нагрузки ННБ	0-0-WT-A-E-0-RR-TD

Подготовлено:
Инженер-конструктор ОШД СГК ЦР

Согласовано:
Начальник отдела ШД СГК ЦР


К.Р. Валямов


В.В. Мыкалкин